

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU DE PROCHE SUBSURFACE À L'HORIZON 2050-2100

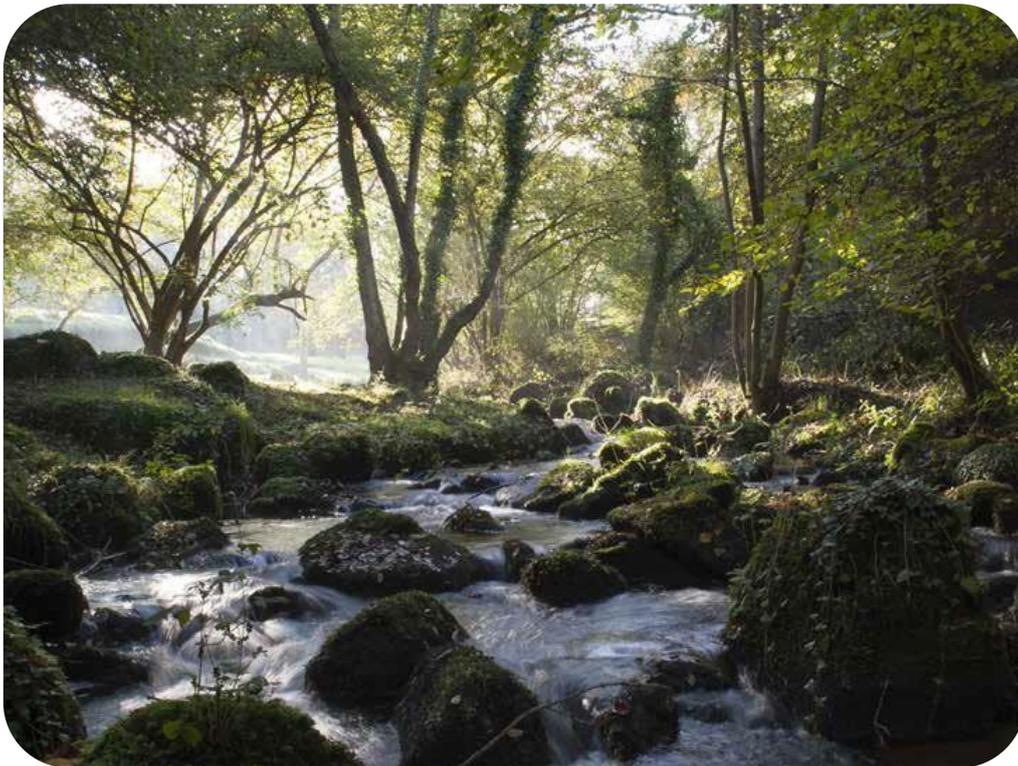


Photo Le Léguer Amont : Eco-bretons.info



Observatoire
des Sciences de l'Université
de Rennes

Rapport intermédiaire

Nicolas Cornette

Jean Raynald de Dreuzy

Alexandre Boisson

Clément Roques

Josette Launay

Guillaume Pajot



30/09/2020

PREAMBULE	1
1 INTRODUCTION.....	3
1.1 GENERALITES SUR LA GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS UNE PERSPECTIVE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES AQUIFERES DE SOCLES CRISTALLINS	3
1.1.1 <i>Les aquifères de socles cristallins</i>	3
1.1.2 <i>Impact du changement climatique sur la ressource en eau à l'échelle globale</i>	5
1.2 ETAT DE L'ART	5
1.2.1 <i>Incertitudes liées à l'impact du changement climatique sur la ressource en eau souterraine</i>	5
1.2.2 <i>Régionalisation des paramètres hydrauliques</i>	6
1.2.3 <i>Estimation des propriétés hydrauliques à l'échelle du bassin versant</i>	7
1.3 OBJECTIFS	8
2 APPLICATION A L'ECHELLE DE LA BRETAGNE	10
2.1.1 <i>Contexte hydroclimatique de la Bretagne</i>	10
2.1.2 <i>Problématiques liées à la gestion de l'eau en Bretagne (échelle régionale)</i>	13
3 METHODOLOGIE	15
3.1 BASE DE DONNEES.....	15
3.1.1 <i>Chroniques hydrologiques</i>	15
3.1.2 <i>Géologie</i>	16
3.1.3 <i>Géomorphologie</i>	17
3.1.4 <i>Climat</i>	18
3.2 IDENTIFICATION DES CLASSES LITHOLOGIQUES MAJORITAIRES PAR BASSIN VERSANT	18
3.3 ESTIMATION D'UN TEMPS CARACTERISTIQUE A PARTIR DE L'ANALYSE DES RECESSIONS INDIVIDUELLES.....	19
3.4 ESTIMATION D'UNE CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT A PARTIR D'UNE EXPLORATION DE PARAMETRES EN UTILISANT UN MODELE D'ECOULEMENT SOUTERRAIN	20
3.4.1 <i>Modèle d'écoulement hs1D</i>	21
3.4.2 <i>Estimation de la conductivité hydraulique à travers l'exploration de paramètres</i>	24
4 RESULTATS	27
4.1 CORRELATION DES PARAMETRES HYDRAULIQUES AVEC LES PROPRIETES DU PAYSAGE	27
4.2 CORRELATION DES PARAMETRES HYDRAULIQUES AVEC LA LITHOLOGIE.....	29
4.3 EXPLORATIONS DE PARAMETRES HYDRAULIQUES	31
4.3.1 <i>Cartes NSE_{log}</i>	32
4.3.2 <i>Cartes d'aires moyennes saturées</i>	33
4.3.3 <i>Chroniques hydrologiques</i>	34
5 DISCUSSIONS.....	37
5.1 UTILISATION DE LA LITHOLOGIE COMME BASE DE REGIONALISATION	37
5.2 INCERTITUDES LIEES A L'ESTIMATION DES PARAMETRES HYDRAULIQUES.....	38
6 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES	40
REFERENCES	42
LISTE DES FIGURES	49
LISTE DES TABLEAUX	51

Préambule

Le projet EAUX2050 s'inscrit dans la **problématique de l'évolution des ressources en eau à l'horizon 2050-2100 dans la perspective du changement climatique et de l'augmentation des pressions anthropiques**. EAUX2050 s'intéresse particulièrement aux ressources en eau souterraine de proche subsurface dans les régions tempérées. Celles-ci assurent des stocks et une alimentation pérenne dans l'année mais, en prise directe avec le forçage climatique, elles sont particulièrement vulnérables à ses évolutions. C'est par exemple le cas de la Bretagne où le climat océanique apporte des précipitations régulières mais où le socle cristallin n'offre que des capacités de stockage limitées pour un enjeu fort de pression sur la ressource.

L'objectif du projet EAUX2050 est de caractériser les eaux souterraines à l'échelle régionale en fonction des structures géologiques et hydrodynamiques, d'évaluer l'impact des changements climatiques sur leur disponibilité et de comprendre comment leur inégale répartition peut être un facteur de vulnérabilité ou d'adaptation. Le projet mettra au point des méthodes de modélisation qui exploiteront au maximum les connaissances disponibles (e.g. géologie, topographie, piézométrie, débits en rivière) tout en fournissant des moyens de prédiction à 50-100 ans à partir de scénarios d'évolution du climat et des pressions anthropiques sur les ressources, particulièrement sensibles dans les périodes d'étiage.

A partir d'une quantité d'informations limitée, **l'enjeu est de mettre au point des méthodes de modélisation pour contraindre les bilans hydrologiques aux différentes échelles de temps hebdomadaires, mensuelles, saisonnières et interannuelles.** Il s'agit, pour cela, de **comprendre comment les structures lithologiques et géologiques contrôlent les flux d'échange entre les compartiments souterrains et superficiels, quelle recharge et quel stockage ils permettent et comment ce stockage s'organise dans l'espace et dans le temps.** A travers cette identification, ce qui est visé, c'est la capacité d'extraire de l'information saisonnière, à l'échelle d'une récession, des éléments déterminants de la résistance de la ressource à des étiages profonds et répétés. Le projet concerne donc l'ensemble de la démarche allant de la donnée jusqu'à la prédiction des effets des changements climatiques en passant par la médiation d'une compréhension des facteurs climatiques et géologiques les plus importants.

A l'échelle régionale, EAUX2050 est destiné à alimenter l'appui aux politiques publiques sur le développement des connaissances sur les eaux souterraines. Il rassemble des chercheurs de l'OSUR (Géosciences Rennes) et du BRGM, et des syndicats ayant pour intérêt commun l'évaluation de l'évolution des ressources en eaux souterraines dans la perspective du changement climatique. Au printemps 2018, les syndicats départementaux producteurs d'eau potable en Bretagne ont questionné le CRESEB (Centre de Ressources et d'Expertise sur l'Eau de Bretagne) sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de Bretagne. Cette interrogation fait suite à deux années de sécheresse (2016 et 2017) impactant aussi bien les ressources en eaux superficielles que souterraines avec des conséquences sur les ressources en eau potable dans certains secteurs.

Le CRESEB a apporté une première réponse en créant un groupe de travail constitué des collectivités en charge de la production d'eau potable, des structures porteuses de SAGE, d'associations et de scientifiques (OSUR, BRGM, Agrocampus, UnivRennes2-LETG, MétéoFrance). Dans la dynamique de réflexion de 4 réunions d'échanges en 2018, le groupe de travail a proposé deux sujets sur l'identification de 4 à 5 bassins versants à enjeux, comprenant une phase d'identification et de collecte des informations disponibles et des modèles hydrogéologiques existants, et sur l'identification de scénarios climatiques pertinents sur le long terme pour ces secteurs. Ces deux sujets ont été traités dans deux stages de master 2. Le travail sur les eaux souterraines se poursuit dans le cadre de cette thèse EAUX2050 (2020-2022) co-financée par une bourse du Conseil régional de Bretagne (80%) et le BRGM (20%).

A l'échelle nationale, EAUX2050 s'intégrera dans le projet de modélisation des aquifères à l'échelle nationale AquiFR. AquiFR étant également destiné à représenter les compartiments souterrains dans les modèles climatiques, il apportera au projet un impact sur la modélisation de l'évolution climatique. **A l'échelle internationale**, EAUX2050 participera à la dynamique des études à l'échelle globale cherchant à offrir des moyens de prédiction sur les ressources en eau sur l'ensemble des continents. Amorcée par les modèles climatiques, cette dynamique s'étend actuellement à l'ensemble des réservoirs continentaux dont les aquifères. Nous proposons que des projets tels que EAUX2050 montés à une échelle régionale à partir de sites locaux soient un facteur déterminant de progrès dans la prise en compte des structures géologiques dans l'évaluation des ressources en eau à grande échelle.

1 Introduction

Cette section vise à présenter le contexte amenant au projet de thèse. Elle s'intéresse dans un premier temps à présenter les généralités des propriétés hydrodynamiques des aquifères cristallins et de l'intégration du milieu souterrain dans les études visant à étudier les impacts du changement climatique. Ensuite l'état de l'art précisera les cibles scientifiques que posent le projet de thèse. Cet état de l'art permet d'amener les hypothèses de travail ainsi que les objectifs suivis de la méthodologie générale permettant d'exploiter les hypothèses.

1.1 Généralités sur la gestion de la ressource en eau dans une perspective de changement climatique dans les aquifères de socles cristallins

1.1.1 Les aquifères de socles cristallins

Les formations de socles constituent plus de 50% de la surface du globe avec, notamment, une proportion de roches cristallines estimée à 20% de la surface terrestre et fait donc l'objet d'un intérêt scientifique important (Singhal and Gupta, 1999) (Figure 1). L'étude des aquifères de socles cristallins est ainsi internationale, principalement au nord-est de l'Amérique du Nord (e.g. Boutt et al. 2010; DesRoches et al. 2014; Paillet, 1998), en Australie (Banks et al. 2009), en Inde (e.g. Boisson et al. 2014, 2015; Dewandel et al. 2006; Maréchal et al. 2004), dans de nombreux pays d'Afrique (e.g. Chilton and Foster, 1995; Courtois et al. 2010), en Chine (Jiao et al. 2005) ou encore en Europe dans les pays Scandinaves (Banwart et al. 1994) ou en France à travers le massif armoricain (e.g. Le Borgne et al. 2006; Roques et al. 2016; Wyns et al. 2004).



Figure 1. Répartition mondiale des aquifères de socles cristallins (Singhal and Gupta, 1999).

Les aquifères de socles cristallins, composés principalement de granites et de roches métamorphiques, ont été caractérisés et un profil d'altération typique de ces aquifères a été proposé dont les différents horizons présentent des propriétés hydrodynamiques différentes. Ainsi on observe du haut en bas du profil les altérites (ou saprolites), un horizon fracturé et le socle (Figure 2) (Dewandel et al. 2006, Wyns et al. 2004). Ces aquifères sont généralement peu productifs (e.g. Chilton and Foster, 1995; Courtois et al. 2010). Les altérites sont issues de l'altération des minéraux de la roche cristalline et constituent les premières dizaines de mètres d'épaisseurs du profil. Cette altération dépend des conditions climatiques, de la minéralisation de la roche ou encore de l'état de fracturation de la roche (Anderson and Anderson, 2010). Généralement riches en argiles, les altérites ont pour caractéristiques hydrodynamiques principales une porosité relativement élevée (entre 5 et 30%) et une faible conductivité hydraulique¹. L'horizon fracturé est à l'inverse très conducteur au niveau des fissures ou fractures (Dewandel et al. 2006).

De plus, dans les roches cristallines, les paramètres hydrauliques sont hétérogènes latéralement et verticalement. Par exemple, la conductivité hydraulique décroît avec la profondeur (Achtziger-Zupancic et al. 2017; Ingebritsen and Manning, 1999). Cette hétérogénéité dépend également de l'échelle d'étude (Hsieh, 1998).

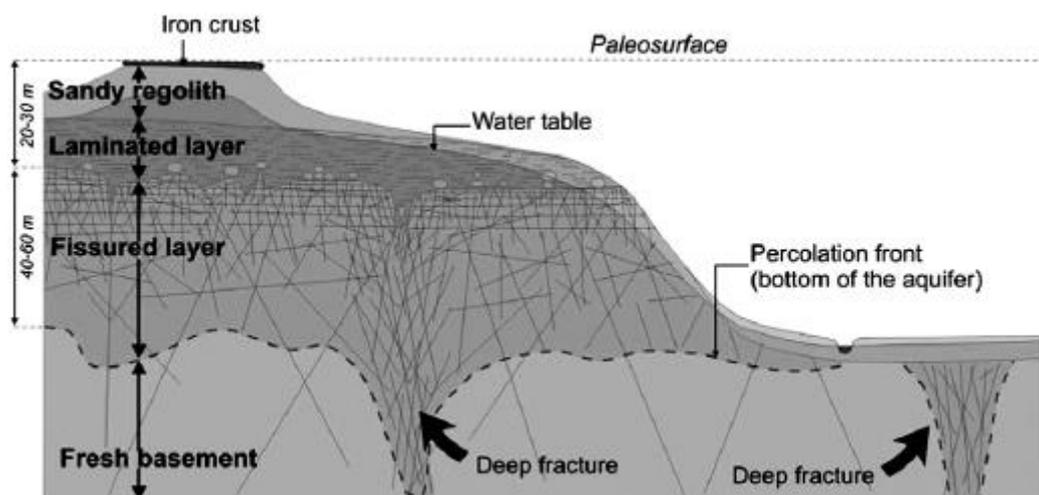


Figure 2. Structure des écoulements et profil d'altération dans les aquifères de socles cristallins (Wyns et al. 2004).

Par conséquent, les altérites par leur stock en eau et/ou les fissures par leur réseau d'écoulement constituent une source potentielle de ressource en eau, notamment en période d'étiage, période critique au cours de laquelle les sécheresses agricoles ou hydrologiques peuvent survenir. La caractérisation de ces aquifères est ainsi nécessaire mais leur forte hétérogénéité spatiale, variable à différentes échelles d'études, rend la prédiction de leurs propriétés hydrauliques difficile.

¹ Les valeurs de conductivité hydraulique rencontrées en Bretagne sont variables du fait de la nature de la couche d'altération, de son épaisseur ainsi que de la densité des fractures et de leur connexion.

1.1.2 Impact du changement climatique sur la ressource en eau à l'échelle globale

Les changements climatiques sont susceptibles d'avoir un impact très important sur la ressource en eau et modifient les différents termes du bilan hydrologique (Lehner et al. 2006; Liu et al. 2018; IPCC, 2007). La ressource en eau est dépendante du bilan hydrologique à travers la température qui influence le taux d'évapotranspiration et à travers les précipitations qui déterminent la recharge des aquifères et le ruissellement alimentant les rivières.

Si l'ensemble des modèles climatiques prédisent une augmentation de la température à la surface du globe, il existe une plus grande variabilité sur la prévision de l'évolution des précipitations, notamment sur la prévision des extrêmes, ainsi qu'une disparité en fonction de la zone géographique (Colmet-Daage et al. 2018; IPCC, 2007).

Le manque de données concernant le milieu souterrain a été pointé comme une limite par l'IPCC (2007) et que la recherche de l'amplitude de l'effet du changement climatique sur les ressources souterraines a ainsi été impossible (Kundzewicz et al. 2007). De plus beaucoup d'études se concentrent sur l'effet du changement climatique sur les eaux de surface et peu sur les eaux souterraines (Kundzewicz and Döll, 2009).

1.2 Etat de l'art

1.2.1 Incertitudes liées à l'impact du changement climatique sur la ressource en eau souterraine

Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eaux sont étudiés par de nombreux scientifiques à travers le monde. Les études montrent une variabilité des prédictions en fonction de la zone géographique. Par exemple, en Europe, il est attendu une augmentation des précipitations en hiver pour les pays le plus au Nord tandis qu'une diminution des précipitations est probable pour la partie Sud, bordant la Méditerranée (Arnell et al. 2011; Christensen et al. 2007). A un niveau plus local, entre ces deux zones, il existe de fortes incertitudes sur l'évolution des précipitations induisant une incertitude sur la recharge des aquifères (Boé et al. 2013). De plus, pour étudier l'impact du changement climatique sur la ressource en eau, une connaissance du fonctionnement des aquifères et de ses propriétés hydrogéologiques (e.g. conductivité hydraulique, porosité, stock disponible etc.) est nécessaire. En effet, la conductivité hydraulique, par exemple, est un facteur prédominant sur le contrôle des flux souterrains contribuant au débit des rivières. Ce soutien est notamment essentiel en période de récession, au cours de laquelle le milieu souterrain est la source principale et permet de soutenir les étiages les plus extrêmes. Cependant ces données sont rarement disponibles à large échelle (i.e. à l'échelle du bassin versant ou à l'échelle régionale) et sont principalement disponibles à une échelle locale à travers les essais de pompage ou les mesures en laboratoires. Cela s'explique par le fait que l'échelle du bassin versant n'est pas l'échelle de mesure des propriétés hydraulique et qu'elles sont généralement caractérisées dans une optique d'exploitation d'un ouvrage. De ce fait, le manque de données à large

échelle sur les propriétés hydrodynamiques des aquifères a réduit le couplage des modèles hydrogéologiques avec les modèles globaux (Bierkens, 2015).

1.2.2 Régionalisation des paramètres hydrauliques

Pour combler le manque de données à large échelle, une régionalisation des paramètres hydrauliques semble nécessaire. La régionalisation est définie comme la technique permettant de transférer de l'information d'un bassin versant à un autre (Blöschl and Sivapalan, 1995). Razavi and Coulibaly (2013) ont synthétisé les différentes méthodes de régionalisation appliquées à la prédiction des débits aux stations non jaugées (Prediction Ungauged basins). L'hypothèse principale de ces techniques est que les caractéristiques du paysage des bassins versants telles que le climat, la géologie, la topographie ou encore l'occupation du sol produisent en général, dans des régions similaires, un comportement hydrologique relativement équivalent (Smakhtin et al. 2001). Les régionalisations ont généralement été utilisées dans une optique de caractérisation de la ressource en eau et principalement dans des modèles hydrologiques simplifiant la représentation du milieu souterrain. Parmi ces études, beaucoup prennent en compte la topographie comme attribut de régionalisation (e.g. Buttle and Eimers's, 2009; Kokkonen et al. 2003; Merz and Blöschl, 2004; Post and Jakeman, 1999; Young et al. 2006), certaines l'occupation du sol (e.g. Cheng et al. 2006; Heuvelmans et al. 2006; Sefton and Howarth, 1998) et très peu la géologie (e.g. Merz and Blöschl, 2004; Mohamoud, 2008). Quelques études se sont intéressées à la régionalisation de paramètres hydrauliques, principalement sur des aquifères alluviaux et sédimentaires (e.g. de Marsilly et al. 1984; Ahmed and de Marsilly, 1987). D'autres ont régionalisé des propriétés hydrauliques pour des aquifères de roches cristallines en utilisant des mesures effectuées à travers les essais de pompage (Razack and Lasm, 2006). Cependant ces études ont été effectuées sur des mesures dans les zones les plus productives créant un biais potentiel sur la surestimation des paramètres hydrauliques. Une approche alternative a été développée par Dewandel et al. (2012) basée sur l'exploitation de la variation des charges hydrauliques à la suite de tests hydrauliques à petite échelle sur des puits de forage. Cette méthode nécessite cependant un nombre important de puits de forage afin de régionaliser les propriétés hydrauliques.

A large échelle, dans le Global HYdrogeology MaPS (GLHYMPS), les conductivités hydrauliques ont été compilées en fonction des unités lithologiques principales dans l'objectif de faciliter la paramétrisation des modèles hydrogéologiques (Gleeson *et al.*, 2014, 2011). Cette cartographie permet également d'estimer les propriétés hydrauliques dans les régions avec peu de données ou pour les stations non jaugées. Elle a principalement pour objectif d'être utilisée dans les modèles globaux (Gleeson *et al.*, 2011). Cependant, si cette cartographie de la conductivité hydraulique simplifie la paramétrisation des propriétés hydrauliques à large échelle, elle ne permet pas une utilisation à une échelle plus locale comme celle du versant ou du bassin versant (ordre de quelques centaines de km²). En effet, dans GLHYMPS, les roches cristallines sont considérées comme une seule entité lithologique très peu perméable. A une échelle plus locale il a été montré que les perméabilités pouvaient être plus élevées (Clauser, 1992). Ainsi une caractérisation des propriétés hydrauliques à une échelle intermédiaire entre l'échelle de site, i.e. les essais de pompage, et l'échelle régionale est nécessaire.

Si les conductivités hydrauliques ont été régionalisées à travers des techniques d'interpolation et à travers les méthodes de géostatistiques, ces techniques présentent des biais à travers l'utilisation de données issues de zones les plus conductives caractérisés pour l'exploitation d'ouvrages. A l'échelle du bassin versant (plusieurs centaines de km²), la conductivité hydraulique peut-être estimée à travers l'analyse de récession ou à travers la calibration de modèles. Ces méthodes sont basées sur l'exploitation des chroniques hydrologiques, échelle d'intérêt pour les gestionnaires de la ressource en eau.

1.2.3 Estimation des propriétés hydrauliques à l'échelle du bassin versant

Les analyses de récessions² sont basées sur la partie décroissante des chroniques hydrologiques qui suivent les pics de crues (Tallaksen, 1995). Ces techniques reposent sur la représentation graphique des chroniques de débits en période de récession sous la forme du ratio de l'évolution temporelle du débit $-dQ/dt$ en fonction du débit Q sous une échelle bi-logarithmique (Brutsaert and Nieber, 1977). La relation de puissance (Equation 1) entre les deux permet d'estimer 2 paramètres, i.e. a et b , contenant respectivement de l'information sur les propriétés hydrogéologiques des aquifères et sur l'hétérogénéité du milieu.

$$-\frac{dQ}{dt} = aQ^b \quad (1)$$

L'estimation de ces paramètres est sujette à de fortes incertitudes et est fortement dépendante de la méthode utilisée (Chen et al. 2018; Roques et al. 2017; Stoelzle et al. 2013). L'analyse de récession peut être divisée en deux types de méthodes : 1) L'analyse du "nuage de points" contenant l'intégralité des récessions et permettant d'obtenir une information globale sur le bassin versant (e.g. Brutsaert and Nieber, 1977; Clark et al. 2009; Rupp et al. 2004; Vannier et al. 2013) et 2) l'analyse des récessions individuelles permettant d'obtenir une information sur la variabilité de comportements de réponse à travers les différentes récessions (e.g. Basso et al. 2015; Karlsen et al. 2018; Roques et al. 2017). Si les méthodes de sélection et de calibration des récessions diffèrent, elles sont toutes basées sur des processus d'écoulement souterrains et ne prennent pas en compte l'interception de la nappe avec la surface. De plus, l'estimation d'une conductivité hydraulique à travers la méthode d'analyse de récessions nécessite l'estimation de la porosité, de la profondeur de l'aquifère ainsi que de la longueur d'écoulement suivant l'équation (2) :

$$a = \frac{4.804.k^{1/2}.L}{f.A^{3/2}} \quad b = 3/2 \quad (2)$$

² La récession correspond à la période de décrue d'un cours d'eau (infiltration dans la zone non-saturée) puis de tarissement quand le cours d'eau n'est plus alimenté que par la vidange des réservoirs souterrains. On peut donc avoir des informations sur le fonctionnement des deux parties de l'aquifère (milieu souterrain) : la zone non saturée et la zone saturée. L'analyse des récessions permet ainsi d'appréhender la contribution des eaux souterraines au débit de base des rivières.

avec :

- k : conductivité hydraulique (m/s)
- L : longueur d'écoulement (m)
- f : porosité (-)
- A : surface du bassin versant (m²)

L'estimation de propriétés hydrauliques à partir de l'analyse des récessions nécessite alors d'effectuer une hypothèse sur la porosité et de caractériser des propriétés géomorphologiques du bassin versant créant un biais sur l'estimation. Cette méthode a notamment été utilisée par Vannier et al. (2013) pour caractériser la conductivité hydraulique et la profondeur des aquifères en Cévennes dans une optique de régionalisation basée sur les lithologies dominantes. Les conductivités hydrauliques estimées pour les granites dans cette étude, se situent dans les limites hautes (entre 7.10^{-5} m/s et 1.10^{-3} m/s) des gammes estimées en essais de pompage (entre 7.10^{-8} m/s et 4.10^{-5} m/s avec une moyenne à 2.10^{-6} m/s estimés par Dewandel et al. (2006)).

Un **temps caractéristique**³ d'une récession peut également être caractérisé à partir de l'analyse de récession suivant l'équation (3) :

$$\log\left(-\frac{dQ}{dt}\right) = \log\left(\frac{1}{\tau}\right) + \log(Q) \quad (3)$$

1.3 Objectifs

L'état de l'art a permis d'identifier un manque de connaissance sur les propriétés hydrauliques à large échelle, i.e. au-delà de l'échelle de l'essai de pompage et du forage. Ce manque de connaissance a été investigué dans des optiques de régionalisation de paramètres hydrauliques. Cependant ces régionalisations sont effectuées sur la base de mesures à une échelle locale, souvent effectuées sur les zones les plus productives car liées à de l'exploitation en eau potable créant en biais sur la surestimation de ces propriétés. De plus la méthode utilisée par Dewandel et al. (2012) nécessite un nombre de forages très important sur le bassin versant ne permettant pas la régionalisation systématique des paramètres hydrauliques aux aquifères de roches cristallins. Vannier et al. (2013) ont estimé des paramètres hydrauliques à l'échelle du bassin versant en utilisant des analyses de récessions basées sur l'exploitation de chroniques hydrologiques. Ces analyses utilisent le processus de vidange souterraine comme processus unique de transfert du milieu souterrain vers la rivière en période de récession et ne prennent ainsi pas compte de l'interception de la nappe vers la surface. Ainsi les conductivités hydrauliques estimées se situent en limite haute des

³ Le temps caractéristique donne une indication sur le temps que met le stock à se vidanger ; la valeur du temps caractéristique est d'autant plus faible que le stock est limité et que les écoulements sont rapides et superficiels. Il donne ainsi une information sur la géologie et la géomorphologie.

conductivités hydrauliques mesurées par les essais de pompage pour les moins perméables voir en dehors de ces limites pour les plus perméables.

Cette étude vise, par conséquent, à régionaliser les paramètres hydrauliques à une échelle d'étude non exploitée, celle de la centaine de km², à partir de l'exploitation des chroniques hydrologiques en utilisant un modèle d'écoulement souterrain. Ce modèle d'écoulement permet d'intégrer un processus d'interception de la nappe avec la surface permettant un transfert plus rapide du milieu souterrain vers la rivière.

Cette étude repose alors sur 2 hypothèses essentielles :

1. La lithologie est corrélée à la conductivité hydraulique et peut servir de paramètre de régionalisation des paramètres hydrauliques.
2. Il est possible d'extraire, à partir des chroniques hydrologiques, de l'information sur l'hétérogénéité des propriétés hydrauliques à l'échelle du bassin versant.

Ainsi cette étude vise à régionaliser la conductivité hydraulique en fonction des lithologies dominantes à une échelle d'intérêt. Cette échelle se situe entre l'échelle locale, celle des essais de pompage et une échelle régionale, continentale voir mondiale.

Les hypothèses sont testées suivant la méthodologie générale suivante :

1. Identification des lithologies par bassin versant.
2. Estimation des paramètres hydrauliques effectifs aux bassins versants.
3. Corrélation entre les paramètres hydrauliques et la lithologie.
4. Validation de la méthode sur un site d'étude différent puis extrapolation à des stations non jaugées.

2 Application à l'échelle de la Bretagne

Les hypothèses formulées dans la section précédente sont testées sur un site d'étude : La Bretagne. Ce site comporte des aquifères de roches cristallines et comporte un grand nombre de stations jaugées permettant l'exploitation des chroniques hydrologiques pour des bassins versants de l'ordre de la centaine de km². Le contexte hydroclimatique est dans un premier temps présenté puis la variabilité des comportements hydrologiques observables sur le territoire ainsi que les problématiques associées actuelles ou potentielles dans un cadre de changement climatique.

2.1.1 Contexte hydroclimatique de la Bretagne

La Bretagne, bien que caractérisée par un régime océanique, est soumise à des variations spatiales climatiques notamment sur les précipitations. En effet, on observe une influence océanique plus forte sur la partie ouest (cumul de précipitation moyen annuel supérieur à 1000 mm) qu'à l'Est (cumul de précipitation moyen annuel inférieur à 800 mm). A une échelle plus fine, on note un effet orographique, lié au relief des Monts d'Arrée à l'ouest, et un effet côtier sur les précipitations (Figure 3).

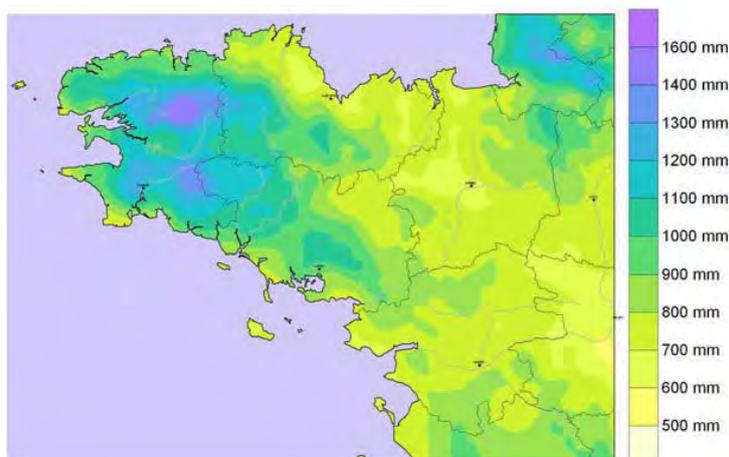


Figure 3. Répartition spatiale du cumul annuel des précipitations en Bretagne (Belleguic, 2012).

Comme tout bassin versant, l'hydrologie du massif armoricain est influencée par le partitionnement hydrologique des précipitations entre le milieu souterrain et le milieu superficiel (Figure 4). En effet, une partie des précipitations rejoint directement les aquifères par infiltration et constitue la recharge. Celle-ci alimente le stock en eau nécessaire au soutien d'étiage en période d'estivale. Une autre partie ruisselle à la surface et rejoint directement la rivière. L'évapotranspiration permet l'équilibre du cycle de l'eau.

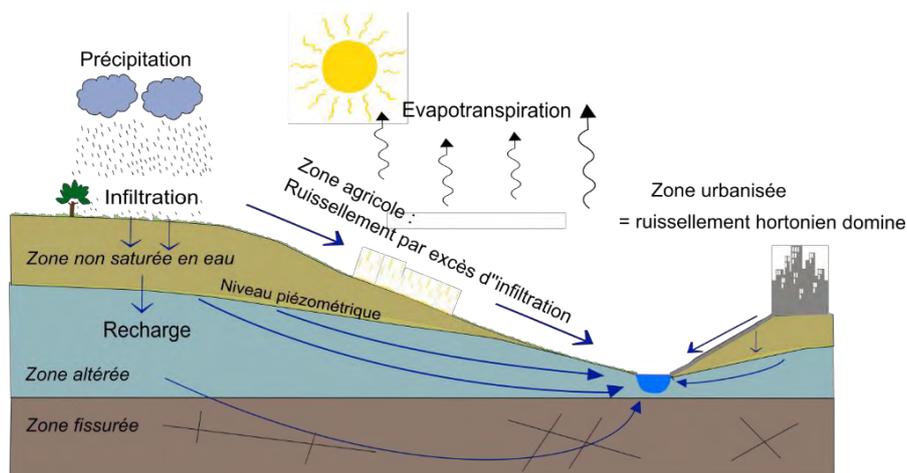


Figure 4. Partitionnement des précipitations entre le milieu superficiel et le milieu souterrain.

En Bretagne, environ 75% de l'alimentation en eau potable provient des eaux superficielles, i.e. les cours d'eaux et les retenues d'eaux (SIGES Bretagne). Ce chiffre est lié à la géologie des aquifères bretons considérés comme très peu perméables et fortement hétérogènes rendant difficiles leurs exploitations. Les variations spatiales des précipitations induisent une disparité Est-Ouest de la recharge des aquifères. Le projet SILURES (Système d'Information pour la localisation et l'utilisation des ressources en eau souterraines) a été financé dans l'objectif d'obtenir un outil d'aide aux gestionnaires pour la localisation des ressources en eaux souterraines dans une optique d'exploitation en eau potable (Mougin et al. 2008). Ce projet a notamment permis d'estimer le pourcentage de la contribution des eaux souterraines au débit des rivières pour chaque bassin versant (Figure 5).

Variabilité des comportements hydrologiques

Chaque bassin possède une signature hydrologique singulière. Elle dépend des précipitations mais également de la structure géomorphologique du bassin versant, de l'occupation du sol ou encore des propriétés hydrauliques de l'aquifère (Price, 2011). La compréhension du rôle de chacun des facteurs est essentielle dans une optique de prévision des débits d'étiage.

Les débits spécifiques moyens de 2 chroniques hydrologique, i.e. ceux de l'Arguenon (à gauche) et de l'Horn (à droite), sont présentés Figure 6. Ce débit spécifique moyen est mis en relation avec celui d'une année extrême, i.e. celle de l'année 2003, et des déciles 10 et 90. Un signal saisonnier, représentatif de la diminution du débit, est calé en fonction d'une décroissante exponentielle par rapport à la courbe des débits afin d'en estimer un temps caractéristique (e.g. 55 jours pour la station de l'Arguenon et 170 jours pour la station de l'Horn). Ces 2 graphiques permettent de mettre en valeur la diversité des comportements hydrologiques à l'échelle de la région. On en déduit que la diminution du débit de la rivière est plus importante dans l'Arguenon que dans l'Horn.

Les problématiques du point de vue de la ressource en eau sont ainsi différentes avec un risque de sécheresse plus important pour l'Arguenon. Un autre signal est généralement caractérisé, celui à l'échelle de la récession. Ce signal est important puisqu'en récession le débit de la rivière est majoritairement issu du milieu souterrain.

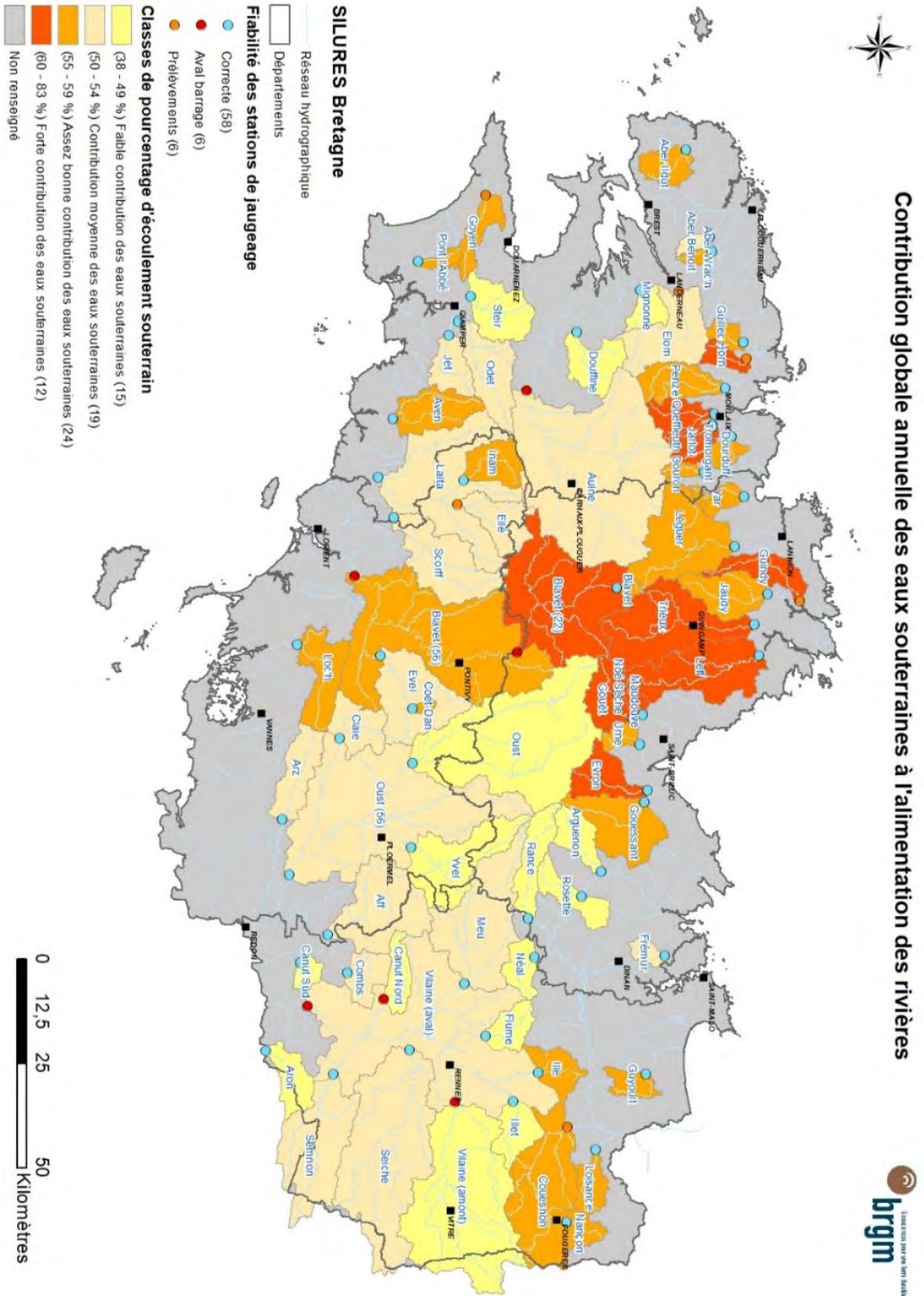


Figure 5. Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières pour la région Bretagne (Mougin et al. 2008)

Ainsi l'analyse du signal hydrologique en période de récession permet de caractériser les aquifères par son stock en eau et par sa distribution sur le territoire. La méthode d'estimation des temps caractéristiques des récessions est détaillée dans le Chapitre 3.3.

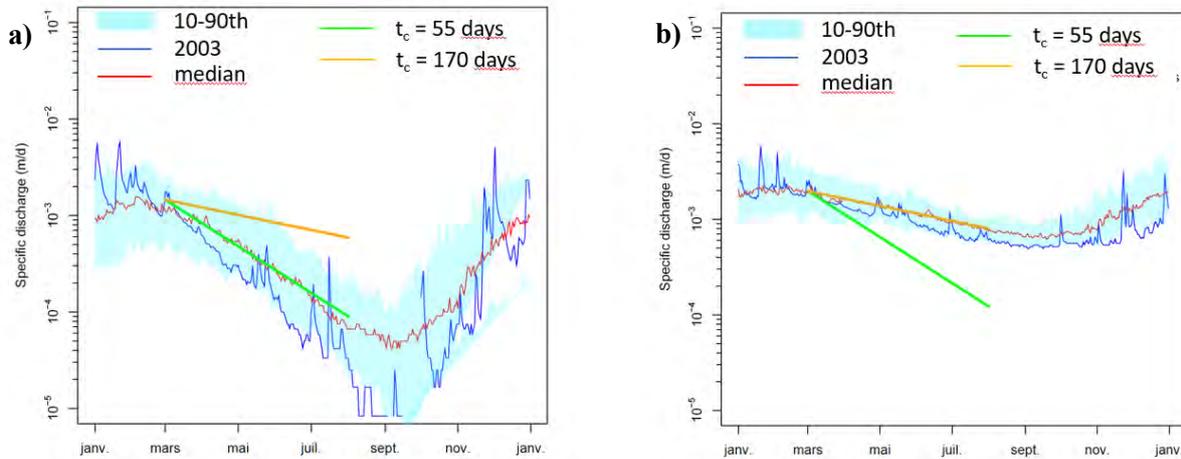


Figure 6. Comparaison de deux chroniques hydrologiques (a. Arguenon; b. Horn) mettant en évidence la variabilité de comportements à l'échelle de la saison et à l'échelle de la récession.

2.1.2 Problématiques liées à la gestion de l'eau en Bretagne (échelle régionale)

En Bretagne, la ressource en eau est principalement liée aux épisodes de précipitations en hiver et de faible évaporation et se retrouve principalement en surface du fait du stock limité du milieu souterrain. Par conséquent, cette ressource est sensible aux variations climatiques interannuelles et vulnérable à la pollution. De plus, l'augmentation de la population induit une augmentation des prélèvements. La pression sur la ressource en eau est croissante du point de vu de la qualité que de la quantité (Bevillon, 2016).

Des évènements extrêmes, critiques pour les gestionnaires, ont déjà été recensés. En premier lieu les sécheresses, avec notamment l'année 1976 souvent utilisée comme référence pour comparer les années hydrologiques, sont de plus en plus fréquentes. Les inondations sont également observables comme par exemple en 2010 avec les phénomènes de grandes marées qui ont eu pour conséquences des inondations de cours d'eau à proximité de la mer comme la Laïta et le Trieux.

Les simulations dans le contexte de changement climatique indiquent une potentielle diminution des précipitations en période estivale ainsi qu'une augmentation des épisodes de fortes précipitations. Ces prévisions indiqueraient un allongement de la période de l'été ainsi qu'un décalage de la période de recharge dans la saison hydrologique (Belleguic, 2012). Les simulations des différents scénarios climatiques (A2, B1 et A1B) sur la Bretagne ont été réalisées en utilisant le modèle climatique ARPEGE de Météo-France. Comme indiqué dans le rapport de Belleguic (2012), les résultats sont à prendre avec une grande précaution car ils

consistent en un zoom régional de simulations réalisées à l'échelle globale. Les résultats semblent indiquer une augmentation des températures moyennes annuelles de même qu'une diminution des précipitations moyennes annuelles. Cependant l'évolution des précipitations est moins significative que celles des températures et comporte un grand nombre d'incertitudes. L'évolution des températures est plus importante sur la partie continentale qu'au niveau du littoral. Le gradient des précipitations sur l'axe Est-Ouest resterait identique avec un facteur multiplicatif de 2. Une baisse des précipitations d'été est également observable sur tous les scénarios simulés tandis que les précipitations moyennes en hiver resteraient constantes. De plus l'utilisation du modèle climatique ARPEGE semble indiquer une augmentation de l'intensité des sécheresses (Lamy, 2013).

3 Méthodologie

La méthodologie générale référencée dans la section 1.3 et testée sur le Bretagne (section 2) est détaillée au cours de cette section. Au préalable, la base de données servant à tester les hypothèses est documentée ainsi suivi des méthodes permettant l'identification des lithologies dominantes et de l'estimation des paramètres hydrauliques par bassins versants.

3.1 Base de données

3.1.1 Chroniques hydrologiques

Les données de débits de rivière sont mesurées au niveau des stations de jaugeage à partir des hauteurs d'eau par le biais des courbes de tarage (Harrelson et al. 1994). Ces données sont représentatives du bassin versant en amont de la station qui représente alors l'exutoire. Ainsi, contrairement aux données piézométriques qui apportent une information locale sur la ressource en eau, les données de débits conduisent à une information à l'échelle du bassin versant.

Ces données sont disponibles en libre accès dans la base de données nationale "Banque Hydro" et sont fournies, pour le massif armoricain, via la DREAL Bretagne. Pour la majorité des stations la couverture temporelle des données permet d'acquérir une information représentative de plusieurs décennies à un pas de temps journalier (SANDRE, 2006).

Seules les stations en amont des barrages et référencées comme "régime non influencé" ont été retenues afin de caractériser une dynamique naturelle et non anthropisée des écoulements. Ces stations sont en amont des barrages. Les stations non influencées et retenues pour l'analyse des chroniques hydrologiques sont représentées sur la Figure 7.

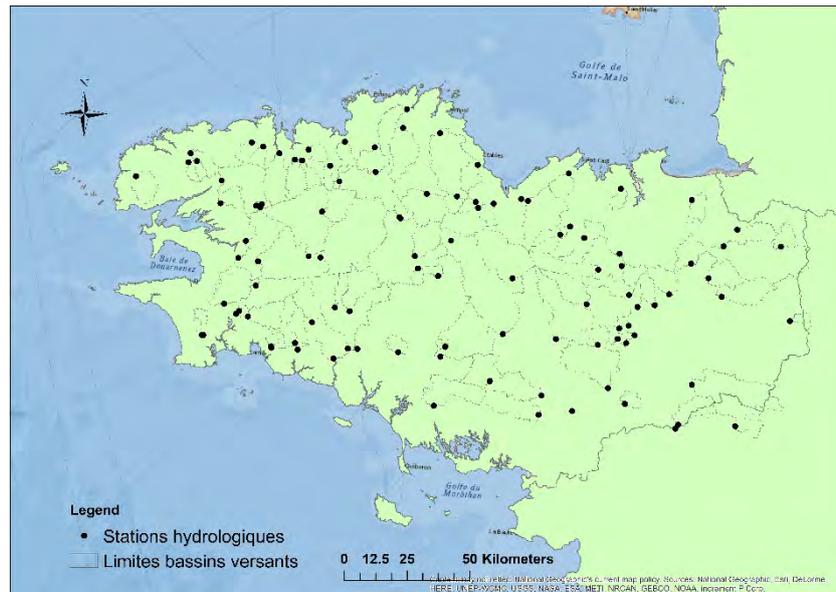


Figure 7. Répartition géographique des stations hydrologiques sans anthropisation majeure permettant de caractériser le milieu naturel.

3.1.2 Géologie

Les données géologiques de la Bretagne sont fournies par le BRGM et contiennent de l'information sur les lithologies à différentes échelles :

1. La carte géologique au 1/250 000
2. La carte géologique au 1/50 000

La carte géologique au 1/250 000 décrit la géologie globale de la Bretagne tandis que la carte géologique au 1/50 000 permet de détailler au sein d'un bassin versant l'hétérogénéité géologique. Une carte a également été élaborée au BRGM sur la base de la carte géologique régionale 1/250 000 (Rabu et al. 2001) et a été simplifiée à travers 8 classes lithologiques (Figure 8).

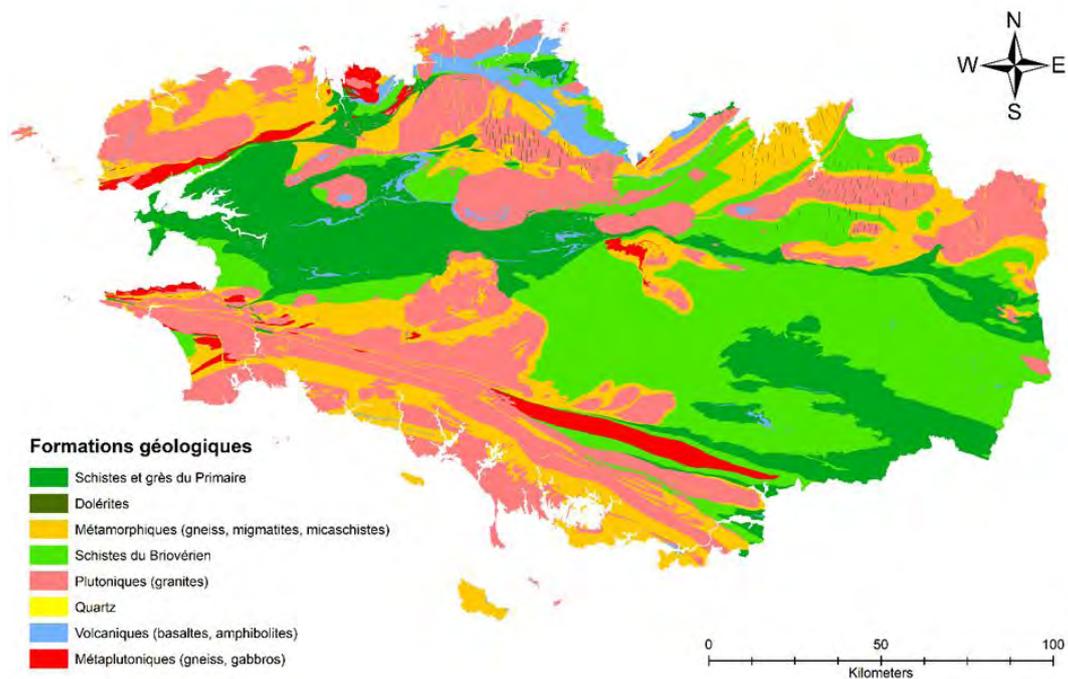


Figure 8. Carte de la lithologie simplifiée du Massif Armoricaïn (Mougin et al. 2008).

Les cartes de l'épaisseur des altérites ainsi que de l'épaisseur du milieu fissuré en Bretagne, caractérisés dans le projet SILURES sont également utilisées dans cette étude (Mougin et al. 2008) (Annexe I et II).

3.1.3 Géomorphologie

Le modèle numérique de terrain (MNT) de la Bretagne a été utilisée pour décrire la géomorphologie des bassins versants en utilisant la BD ALTI à une résolution spatiale de 50 m (Figure 9).

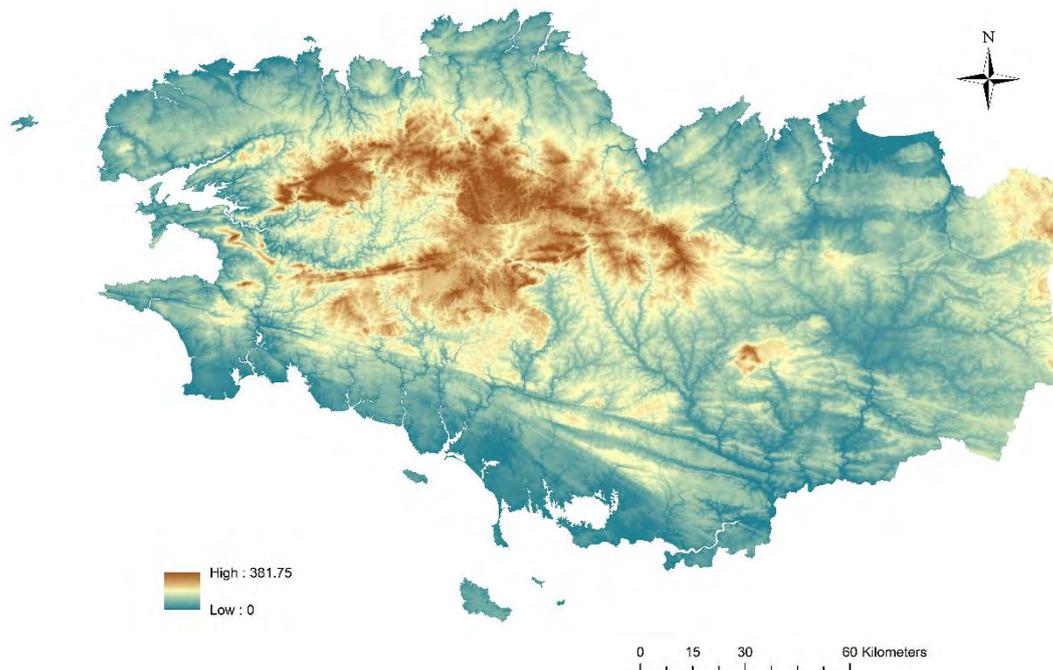


Figure 9. Modèle numérique de terrain de la Bretagne à une résolution de 50m.

3.1.4 Climat

Les simulations sont forcées avec les données dérivées du modèle SURFEX (Le Moigne et al. 2009). Le modèle SURFEX permet un partitionnement des précipitations (P) en évapotranspiration réelle (ETR), en recharge vers le milieu souterrain (DRAIN) et en ruissellement de surface (RUNOFF). Ce partitionnement est dépendant des conditions atmosphériques, de l'occupation du sol et de la végétation. La résolution spatiale du forçage climatique est paramétrée pour des mailles de 8km par 8km sur l'ensemble du territoire national (Le Moigne et al. 2009).

3.2 Identification des classes lithologiques majoritaires par bassin versant

L'objectif principal de la thèse consiste en la régionalisation de paramètres hydrauliques sur la base de classes lithologiques à l'échelle régionale. Ainsi la définition des classes lithologiques à l'échelle d'étude, i.e. l'échelle du bassin versant (100km²), devient une étape déterminante pour la suite de l'étude.

Dans un premier temps, la détermination des classes lithologiques majoritaires par bassin versant a été effectuée en utilisant la carte du regroupement lithologique à l'échelle du 1/250 000 (Mougin et al. 2008). L'objectif étant de simplifier la carte géologique afin d'avoir une quantité d'informations synthétiques et transposables d'un bassin versant à un autre tout en représentant les différents comportements observables à travers les chroniques hydrologiques.

L'analyse des chroniques hydrologiques permet d'identifier le nombre de classes lithologiques à conserver pour la régionalisation.

De ce fait, sous SIG, a été calculé le pourcentage de la surface de chaque classe lithologique couvrant le bassin versant. La classe majoritaire a été fixée comme étant la classe ayant la surface la plus élevée. Une contrainte découle de cette méthode. Les lithologies secondaires, i.e. les lithologies n'ayant pas la surface de recouvrement du bassin versant les plus importantes, sont ignorées.

Ces lithologies sont ensuite mises en relations avec les paramètres hydrauliques estimées à partir des analyses de récessions individuelles et à partir de l'utilisation d'un modèle hydrogéologique.

3.3 Estimation d'un temps caractéristique à partir de l'analyse des récessions individuelles

Contrairement aux analyses de récessions classiques, basées sur l'analyse du nuage de point de l'ensemble des récessions, des méthodes alternatives proposent d'analyser individuellement les récessions. Cette méthode permet notamment d'étudier la variabilité des récessions et d'en comprendre l'origine. C'est notamment le cas de la méthode de Roques et al. (2017) qui propose une méthode de calcul des dérivés prenant en compte les artefacts propres à l'incertitude de mesure de débit. Cette méthode a ainsi été utilisée au cours de l'étude pour estimer un temps caractéristique de récession par bassin versant.

Ces analyses sont basées sur l'hypothèse de Dupuit-Forcheimer qui suppose que les écoulements souterrains sont majoritairement horizontaux permettant de négliger les flux verticaux. Cette hypothèse a conduit aux équations de Boussinesq intégrant la loi de Darcy permettant de décrire les écoulements souterrains dans un aquifère à fond plat (Boussinesq, 1877).

Similairement aux méthodes classiques, l'analyse de récessions individuelles nécessite de définir des critères d'extraction des récessions et de définir la méthode de régression de ces récessions. Les critères pour extraire les récessions sont généralement focalisés sur un nombre de jours définissant une récession, sur une exclusion de certains points où l'influence de processus de surface interviendrait et sur la notion d'amplitude (Stoelzle et al. 2013). Les critères établis dans cette étude prennent en compte des récessions avec une durée minimale et maximale respectivement de 5 et 250 jours, une exclusion du premier point de la récession individuelle pour réduire l'influence des écoulements de surface et une amplitude supérieure à 5 fois l'amplitude minimale pour réduire l'effet des artefacts.

Une fois les périodes de récessions extraites, une régression est appliquée sur chaque récession afin de déterminer les paramètres a et b définis dans la théorie de Brutsaert and Nieber (1977) (Section 1.2.3) et d'estimer des propriétés hydrauliques de l'aquifère. La séparation de la récession à travers la médiane des débits en 2 types de catégories, les temps courts (high flow) et les temps longs (low flow) permet de se focaliser sur la partie de la récession où l'impact des processus diffusifs est majoritaire, les temps longs.

C'est sur les débits d'étiages les plus extrêmes qu'une régression exponentielle, caractéristique d'une vidange d'un aquifère, est appliquée afin d'estimer un temps caractéristique.

Cette équation analytique est basée sur un processus d'écoulement lié à une vidange exponentielle de l'aquifère. Dans ce type d'analyses, l'interception de la nappe à la surface créant une zone de suintement n'est pas prise en compte malgré sa modification du temps des réponses des écoulements. L'utilisation d'un modèle permet d'intégrer ce processus dans les analyses et les estimations de paramètres hydrauliques.

3.4 Estimation d'une conductivité hydraulique à l'échelle du bassin versant à partir d'une exploration de paramètres en utilisant un modèle d'écoulement souterrain

Une méthode alternative aux méthodes d'analyses de récessions est proposée au cours de ce travail à travers l'utilisation d'un modèle d'écoulement souterrain pour analyser les chroniques hydrologiques afin d'extraire des propriétés hydrauliques équivalents aux bassins versants.

Contrairement aux analyses de récessions, l'estimation de paramètres hydrauliques via l'utilisation d'un modèle nécessite la prise en compte de l'intégralité de la chronique hydrologique. Ainsi les processus pris en compte diffèrent. Dans les analyses de récessions, le processus de vidange des aquifères est le seul processus intervenant dans l'estimation de propriétés hydrauliques. Les solutions analytiques sont ainsi basées sur un transfert unique du milieu souterrain à la rivière. L'utilisation d'un modèle fait intervenir un processus de suintement via la saturation des aquifères et fait ainsi intervenir un écoulement superficiel par interception de la nappe à la surface du sol. Par conséquent deux types d'écoulements interviennent, un écoulement rapide à travers le suintement et un écoulement plus lent à travers la vidange de l'aquifère. L'interception de la nappe à la surface s'effectue par excès de saturation. C'est notamment le cas des milieux imperméables comme peuvent l'être les aquifères de socles cristallins.

De plus, l'utilisation d'un modèle diffère sur les analyses de récessions également sur un aspect méthodologique. En effet, l'analyse de récession nécessite de définir des critères d'extractions. Stoelzle et al. (2012) ont montré que les résultats sont extrêmement variables selon le choix des critères d'extractions. Le modèle hydrogéologique, par l'utilisation de l'intégralité de la chronique hydrologique, ne nécessite pas de définir des critères caractéristiques de la période de récession.

Les méthodes d'analyses de récessions et d'utilisation d'un modèle diffèrent donc en 2 points, les processus pris en compte et les critères méthodologiques nécessaires à l'estimation des propriétés hydrauliques. Le modèle physique d'écoulement souterrain hs1D mis en place au cours de la thèse de Quentin Courtois a été utilisé au cours de cette étude (Courtois, 2019).

3.4.1 Modèle d'écoulement hs1D

L'intérêt du modèle hs1D, dans le contexte des milieux cristallins comme celui du massif armoricain, est de pouvoir modéliser à travers une approche physique les écoulements des aquifères à une échelle du bassin versant tout en conservant l'échelle du versant au km². L'approche de modélisation peut être synthétisée en 4 étapes :

1. La décomposition de l'échelle régionale à l'échelle des versants
2. La modélisation des écoulements souterrains dans les versants
3. La modélisation des écoulements superficiels
4. L'agrégation de l'échelle des versants à l'échelle régionale.

L'ensemble de ces étapes est représenté sur la Figure 10 et sont détaillées dans les sections suivantes.

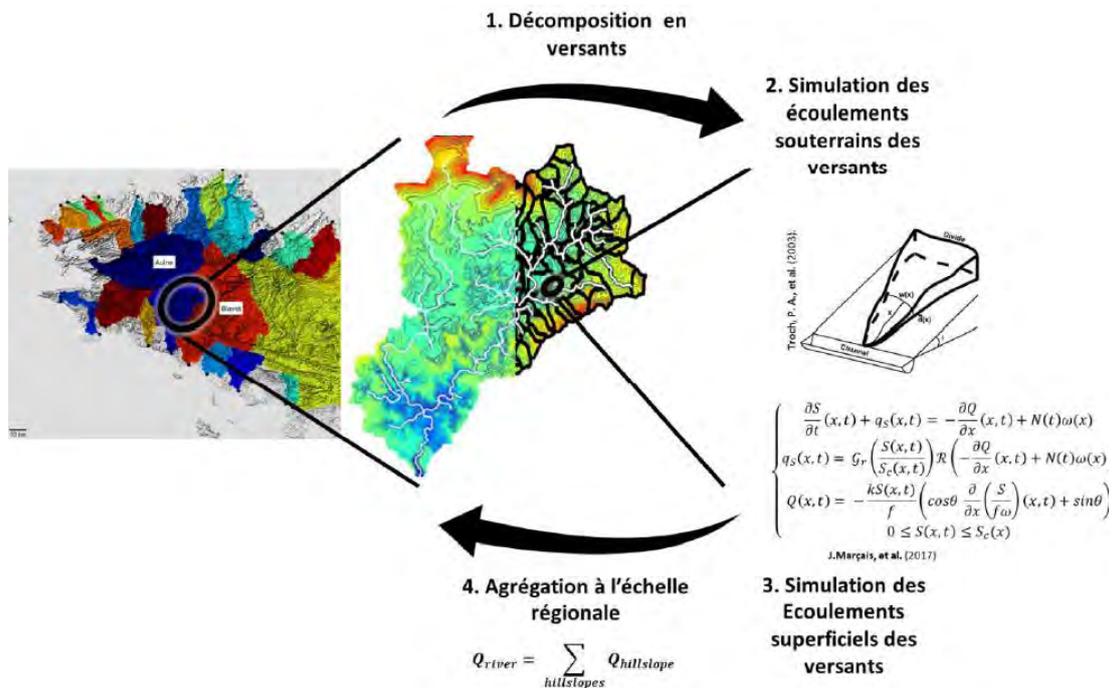


Figure 10. Schéma du modèle hydrogéologique de versants hs1D (Courtois, 2019).

Décomposition de l'échelle régionale à l'échelle des versants

Cette décomposition nécessite au préalable la délimitation du bassin versant à partir du MNT. Cette étape est réalisée en utilisant l'outil TopoToolbox sous Matlab qui permet d'effectuer des opérations géomorphologiques, tels que le calcul des pentes ou la définition des aires drainées permettant la délimitation des bassins versants (Schwanghart and Kuhn, 2010).

Ensuite le bassin versant est délimité en versants permettant de reproduire les écoulements locaux essentiels dans les aquifères de socles cristallins. Les têtes de réseaux, les confluences et l'exutoire déterminent les versants suivant les lignes de plus grande pente. La Figure 11 illustre la méthode de décomposition en versants.

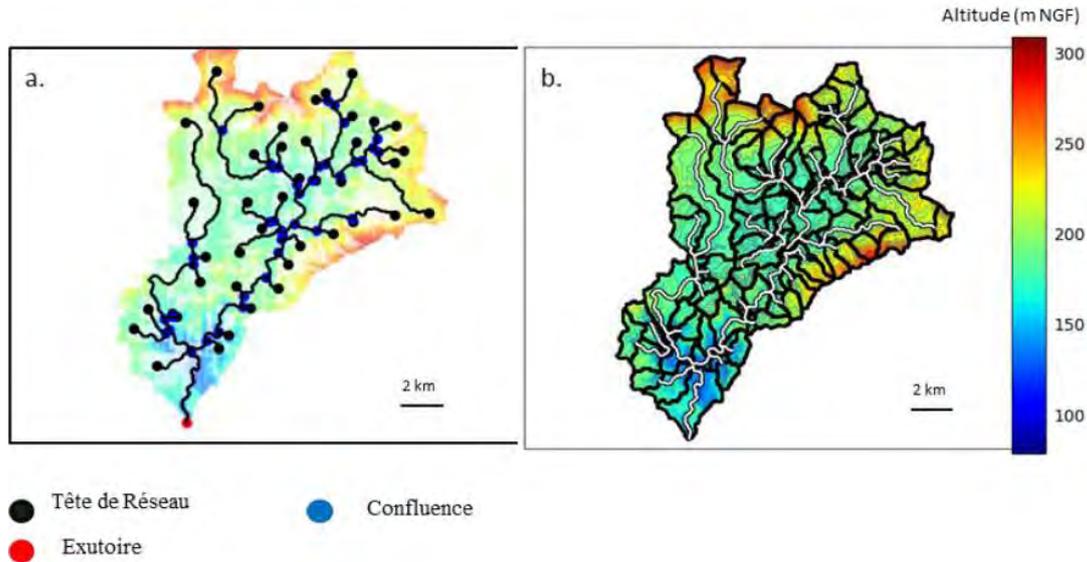


Figure 11. Décomposition du bassin versant en versants (Courtois, 2019).

Il est également possible à partir du modèle de déterminer un versant équivalent. Cette étape, quand elle est utilisée, remplace la décomposition en versants. La pente moyenne de ce versant équivalent, correspondant à une discrétisation 1D, est la moyenne des pentes à une distance x de la rivière (Courtois, 2019).

Modélisation des écoulements souterrains dans les versants

Les écoulements souterrains sont simulés suivant la loi de Darcy représentée sur l'Equation 4 :

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4)$$

Où h est la charge hydraulique [m], K est la conductivité hydraulique [m/s] et q est le flux spécifique de Darcy [m/s] (Darcy, 1856).

Les écoulements souterrains sont ensuite contrôlés par la saturation. En effet, les gradients de saturation induisent les écoulements dans la zone saturée à travers la loi de Darcy. Ensuite lorsque cette saturation excède la capacité de saturation du versant, une zone de suintement se crée. Une part de l'écoulement souterrain se transmet ainsi à la rivière à travers ce ruissellement direct de l'interception de la nappe avec la surface. La dynamique des écoulements et de la saturation à l'échelle des versants peut être ainsi déduite des équations de Boussinesq (1877) et sont référencés dans le travail de Marçais (2017). Les différents types de flux observables à l'échelle du versant sont schématisés sur la Figure 12.

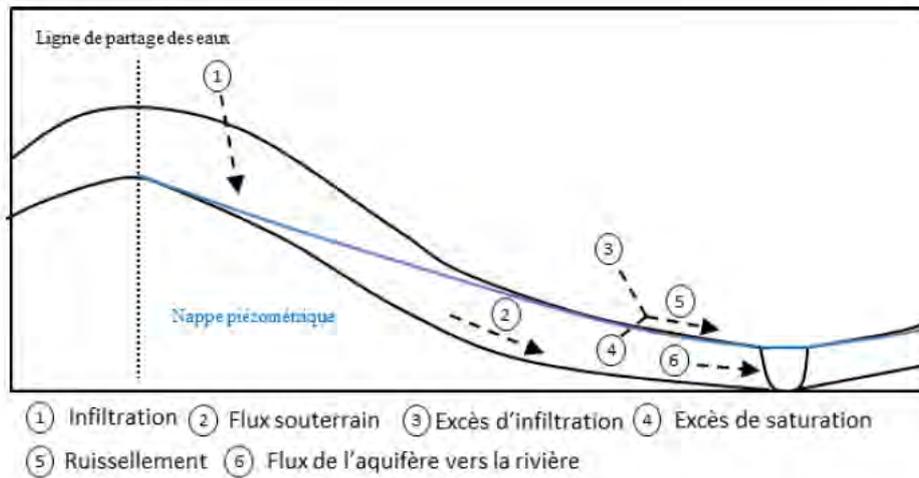


Figure 12. Représentation schématique des différents types de flux à l'échelle du versant pour des aquifères libres de faible épaisseur (Courtois, 2019).

Modélisation des écoulements superficiels

Lorsqu'une zone de suintement apparaît, le débit de la rivière est égal à la somme des flux souterrains et des flux de surface provenant de l'interception de la nappe avec la surface.

Agrégation de l'échelle des versants à l'échelle régionale

La rivière accumule le long du réseau hydrographique les flux des versants contributifs. Ainsi le débit des versants en amont d'un point donné sur le réseau hydrographique s'agrège au débit de la rivière. La contribution de ces versants est calculée pour chaque segment du réseau hydrographique comme schématisée sur la Figure 13.

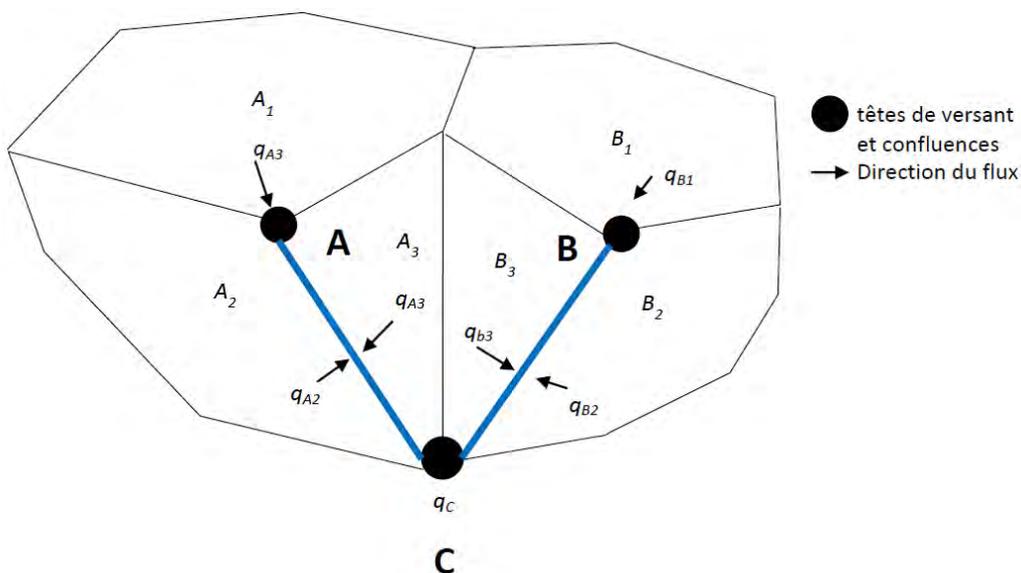


Figure 13. Schéma d'intégration du débit dans la rivière (bleu) à partir des contributions des différents points (A, B, C) et versants (A₁, A₂, A₃, B₁, B₂, B₃) (Courtois, 2019).

3.4.2 Estimation de la conductivité hydraulique à travers l'exploration de paramètres

L'exploration de paramètres permet de faire varier un paramètre en conservant les autres constants selon une gamme de valeur prédéfinie et de mesurer l'écart entre les données simulées et les données réelles. Dans cette étude 2 paramètres ont servi à l'exploration, la conductivité hydraulique (k) et la lame d'eau maximale qui est le produit de la porosité (f) et de l'épaisseur de l'aquifère (D). L'épaisseur de l'aquifère est ici considérée comme constante, i.e. la pente de l'aquifère suit la pente de la surface, tandis qu'une option encore inexploitée consiste à considérer un aquifère avec un fond plat comme indiqué en Figure 14.

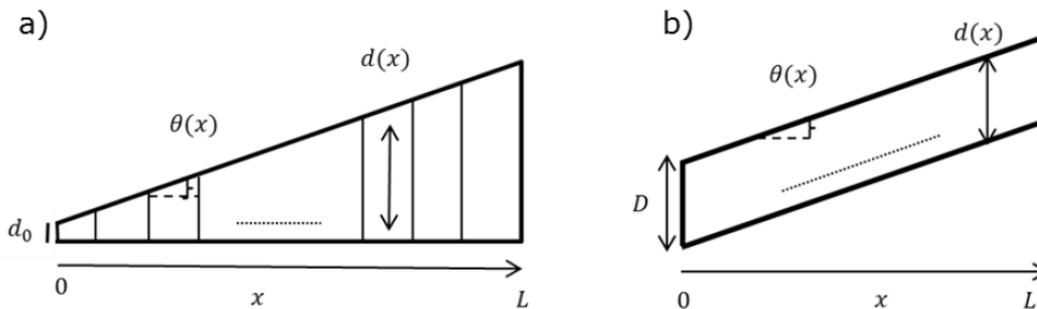


Figure 14. Hypothèses de structure de l'horizon superficiel perméable des massifs cristallins en Bretagne. Schéma selon l'hypothèse a) de fond plat et b) d'épaisseur constante (Courtois, 2019).

Les paramètres de l'exploration sont répertoriés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Gamme d'exploration des paramètres.

Paramètres	Gamme explorée	Unité	Nombre d'exploration
Conductivité hydraulique (k)	10^{-4} à 10	m/h	50
Lame d'eau maximale ($f \cdot D$)	0.03 à 15	m	50

La fonction objective permettant de mesurer la qualité de l'exploration, généralement utilisée dans la calibration des chroniques hydrologiques, est le Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) représentée sous sa base logarithmique pour donner plus d'importance aux débits d'étiages (Equation 5) (Nash and Sutcliffe, 1970).

$$NSE_{log} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (\log(Q_m^t) - \log(Q_o^t))^2}{\sum_{t=1}^T (\log(Q_o^t) - \overline{\log(Q_o)})^2} \quad (5)$$

Où Q_m^t correspondant aux débits modélisés ; Q_o^t correspondant aux débits observés et $\overline{Q_o}$ la moyenne des débits observés.

Le NSE_{log} est compris entre $-\infty$ (moins bonne calibration) et 1 (calibration parfaite). Les modèles sont considérés corrects lorsque le NSE_{log} est supérieur à 0.75 (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013).

Une carte systématique (Figure 15) représentant la lame d'eau maximale et la conductivité hydraulique permet l'estimation d'une conductivité hydraulique à partir de l'identification d'espaces de paramètres optimaux.

2 espaces de paramètres optimaux sont observables sur les cartes NSE_{log} :

1. Un espace, dit espace 1 pour la suite du rapport, concernant les conductivités hydrauliques les moins perméables. Sur cet espace le NSE_{log} est relativement stable à conductivité hydraulique constante et lame d'eau maximale variable.
2. Un espace, dit espace 2 pour la suite du rapport, concernant les conductivités hydrauliques les plus perméables. Sur cet espace le NSE_{log} varie proportionnellement en fonction de la conductivité hydraulique et de la lame d'eau maximale.

Dans un premier temps l'espace 1 est maintenu pour 2 raisons. Dans le travail de Courtois (2019), les aires moyennes de saturation sur quelques bassins versants ont été caractérisées et mises en lien avec des cartes de probabilités de zones humides. L'espace 2 a ainsi été rejeté car les versants n'étaient jamais saturés ce qui était incohérent avec la présence de zones humides sur le bassin versant. De plus, la gamme de conductivité hydraulique obtenue pour l'espace 1 est en adéquation avec la gamme estimée pour les aquifères de roches cristallins dans Dewandel et al. (2006). C'est ainsi à travers les données d'aires moyennes de saturation et de gammes de propriétés hydrauliques que le choix de l'espace 1 pour l'estimation d'une conductivité hydraulique équivalente au bassin versant a été effectué.

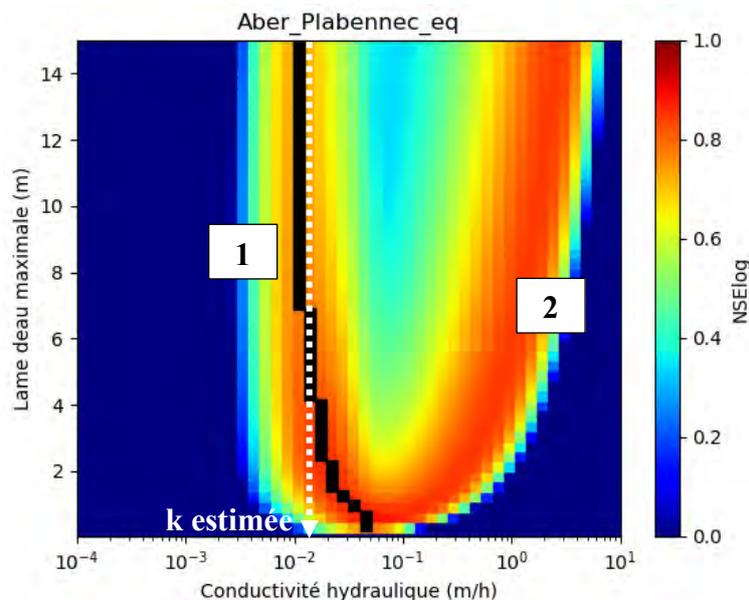


Figure 15. Illustration de la méthode d'estimation de la conductivité hydraulique à partir de l'exploration de paramètres sur un versant équivalent. Les 2 espaces de paramètres optimaux sont représentés en 1 pour les conductivités hydrauliques les moins perméables et en 2 pour les conductivités hydrauliques les plus perméables. En noir sont représentés les NSE_{log} optimaux pour les couples lame d'eau maximale et conductivité hydraulique de l'espace 1. La flèche blanche illustre l'estimation de la conductivité hydraulique équivalente par la médiane des NSE_{log} optimaux de l'espace 1.

Ces données d'aires moyennes de saturation sont également analysées dans cette étude dans la compréhension des processus différenciant les 2 types de lithologies caractérisés dans la section précédente.

Enfin la Figure 15 illustre également la méthode d'estimation de la conductivité hydraulique à partir de l'espace 1. Le NSE_{log} étant relativement identique pour une conductivité hydraulique constante à lame d'eau maximale variable, une méthode a été proposée basée sur la verticalité de cet espace. Par conséquent, pour chaque valeur explorée de lame d'eau maximale et ne considérant uniquement que l'espace 1, il a été identifié la conductivité hydraulique pour laquelle le NSE_{log} était maximal. Ces valeurs de NSE_{log} maximales sont observables en noir sur le graphique. Finalement, la conductivité hydraulique équivalente est considérée comme la médiane de l'ensemble des NSE_{log} optimaux et peut-être identifiée par la flèche blanche.

4 Résultats

4.1 Corrélation des paramètres hydrauliques avec les propriétés du paysage

Afin d'étudier l'influence du climat, de la géologie et de la géomorphologie sur la distribution des propriétés hydrauliques à l'échelle de la Bretagne, une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée. L'ACP est une méthode d'analyse statistique multivariée très utilisée s'intéressant à la description des relations entre des variables quantitatives. Cette méthode est généralement utilisée pour identifier les grandes tendances de corrélation entre différentes variables plutôt qu'à la quantification de ces corrélations. Les différentes variables utilisées dans l'analyse statistique, ainsi que leur description, sont répertoriées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Description des variables utilisées pour l'ACP.

Variables	Unité	Description
Paramètres géomorphologiques		
<i>Mean Slope</i>	%	Pente moyenne du versant équivalent
<i>Hillslope Length</i>	m	Longueur moyenne du versant équivalent
<i>River Length</i>	m	Longueur du tronçon hydrographique principal
<i>Area</i>	m ²	Surface du bassin versant
<i>Convergence</i>	-	Ratio de convergence calculé comme le ratio entre la largeur de l'exutoire par la largeur moyenne du versant équivalent
<i>Strahler</i>	-	Ordre de Strahler
Paramètres géologiques		
<i>Weathered Thickness</i>	m	Épaisseur des altérites
<i>Fissured Thickness</i>	m	Épaisseur de l'horizon fissuré
<i>% Crystalline</i>	%	% de la surface du bassin versant recouvert par une lithologie correspondante aux roches cristallines (granites)
<i>% Metamorphic</i>	%	% de la surface du bassin versant recouvert par une lithologie correspondante aux roches métamorphiques (gneiss, migmatites et micaschistes)
<i>% Brioverian Schist</i>	%	% de la surface du bassin versant recouvert par une lithologie correspondante aux schistes du briovérien
<i>% Schist from Primary era</i>	%	% de la surface du bassin versant recouvert par une lithologie correspondant aux schistes primaires
Paramètres climatiques		
<i>Precipitation</i>	mm/an	Cumul annuel moyen des précipitations (données issues des modèles SURFEX)
<i>Evapotranspiration</i>	mm/an	Cumul annuel moyen de l'évapotranspiration (données issues des modèles SURFEX)
Paramètres hydrodynamiques		
<i>Specific Discharge</i>	m/s	Débit spécifique (Débit à l'exutoire/Area)
<i>Hydraulic conductivity</i>	m/s	Conductivité hydraulique estimée à travers le modèle hs1D
<i>Timescale</i>	jours	Temps caractéristique moyen de récession estimé à travers l'analyse des récessions individuelles
Paramètres des récessions		
Parameter a	-	Paramètre de l'équation de Brutsaert and Nieber (1977)
Parameter b	-	Paramètre de l'équation de Brutsaert and Nieber (1977)

Les résultats de l'ACP sont observables sur la Figure 16. Les 2 premières composantes de l'ACP expliquent environ 47% de la variance entre les différentes variables. Ensuite 4 groupes de variables, positivement corrélées les unes des autres, sont identifiables :

- Groupe PC1⁺: % Crystalline, Parameter b, Mean slope, % Metamorphic, Timescale, Evapotranspiration, Precipitation, Specific Discharge, Hydraulic conductivity.
- Groupe PC1⁻: % Brioverian schist, Weathered Thickness.
- Groupe PC2⁺: River length, area, Strahler, Hillslope length, Convergence, Parameter a.
- Groupe PC2⁻: Fissured Thickness, % Schist from Primary era.

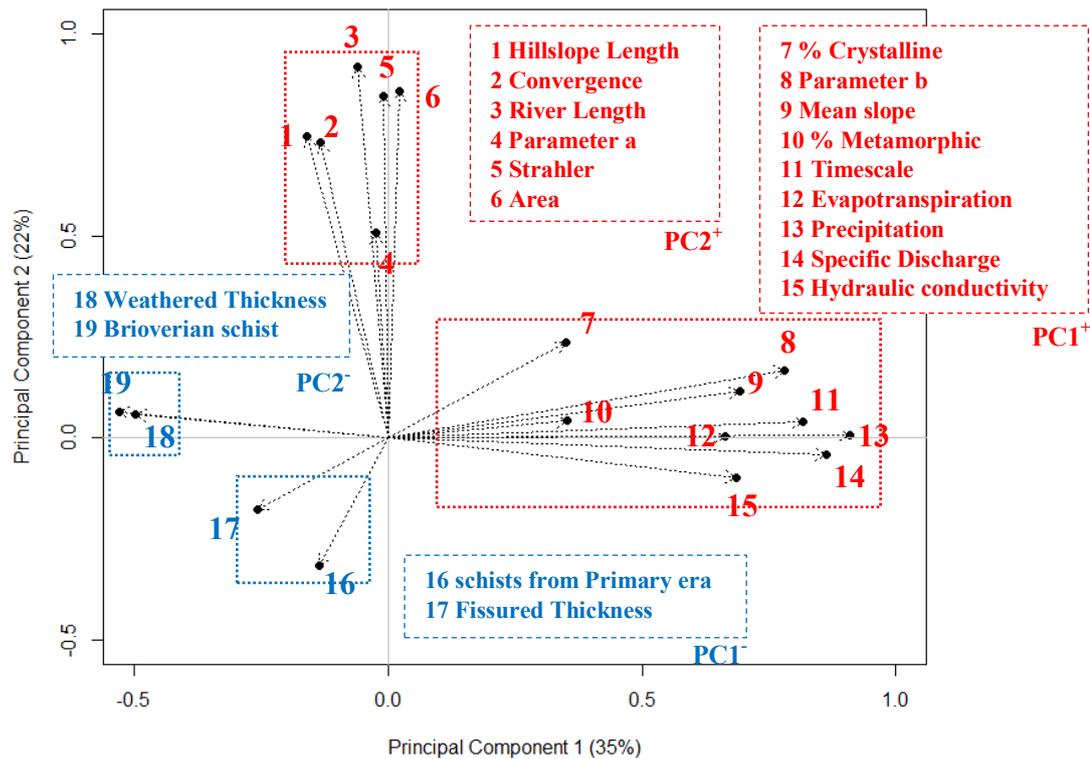


Figure 16. Représentation graphique de l'analyse en composantes principales.

L'observation de la représentation graphique en 2 composantes de l'ACP permet ainsi d'identifier quelques grandes tendances sur les corrélations de paramètres notamment sur les corrélations entre les paramètres caractérisant l'hydrodynamisme du bassin versant et les paramètres caractéristiques du paysage.

1. Les paramètres hydrauliques estimés à l'échelle du bassin versant (i.e. conductivité hydraulique et temps caractéristiques) sont positivement corrélés avec les paramètres climatiques (i.e. précipitation et évapotranspiration annuel).
2. Les paramètres hydrauliques estimés à l'échelle du bassin versant (i.e. conductivité hydraulique et temps caractéristiques) sont positivement corrélés avec les classes lithologiques associées aux roches cristallines (granites) et aux roches métamorphiques (gneiss, migmatites et micaschistes) et négativement corrélés avec la classe lithologique associée aux schistes du briovérien. De plus ils ne sont pas corrélés avec la classe associée aux schistes du Primaire.

3. Les paramètres hydrauliques estimés à l'échelle du bassin versant (i.e. conductivité hydraulique et temps caractéristiques) sont positivement corrélés avec la pente moyenne du versant équivalent, paramètre caractérisant la géomorphologie et ne sont pas corrélés avec les autres paramètres caractérisant la géomorphologie du bassin versant (e.g. la surface du bassin versant, la longueur du réseau hydrographique, le taux de convergence, etc.).
4. L'épaisseur des altérites est positivement corrélée avec la classe associée aux schistes du briovérien et l'épaisseur de l'horizon fissuré est positivement corrélée avec la classe associée aux schistes du Primaire.
5. Les paramètres de l'analyse de récession (i.e. a et b) sont respectivement positivement corrélés avec la géomorphologie du bassin versant et avec les paramètres hydrauliques estimés. De plus le paramètre b est également positivement corrélé aux classes associées aux roches cristallines et métamorphiques.

La conductivité hydraulique et les temps caractéristiques étant corrélés de la même façon à la lithologie, seuls les résultats de la corrélation de la conductivité hydraulique avec la lithologie seront présentés dans les sections suivantes. Les résultats de corrélations du temps caractéristique de récession avec la lithologie seront présentés en Annexes.

4.2 Corrélation des paramètres hydrauliques avec la lithologie

L'analyse statistique à partir de l'ACP a permis d'établir quelques grandes tendances concernant les corrélations des paramètres hydrauliques avec les propriétés du paysage. La lithologie semble être corrélée avec la conductivité hydraulique et avec les temps caractéristiques de récession. La Figure 17 présente une cartographie des conductivités hydrauliques, à l'échelle de la Bretagne, estimées à partir du modèle d'écoulement souterrain hs1D avec pour fond de carte les regroupements simplifiés de la lithologie au 1/250 000. La même carte est obtenue avec les temps caractéristiques en Annexe III. Sur les 106 stations disponibles, 80 stations ont été utilisées pour l'estimation de la conductivité hydraulique. La partie manquante de l'échantillon n'a pas été modélisée par soucis numérique. Les conductivités hydrauliques les plus perméables (i.e. $> 10^{-6}$ m/s) sont estimées pour les bassins versants du Nord-Ouest (e.g. Aber Loc, Aber Plabennec, Douron, Horn, etc.), sur la partie Sud-Ouest de la Bretagne (e.g. Aven, Moros, Pont Abbe) ou encore au Nord-Est sur les granites de Fougères (e.g. Nançon, Loysance). Les conductivités hydrauliques les moins perméables (i.e. $< 10^{-7}$ m/s) sont principalement associées à des bassins versants répartis sur la partie Est du territoire breton. Globalement ces bassins versants sont majoritairement recouverts par les classes lithologiques schistes du briovérien et schistes du Primaire. On peut citer par exemple les bassins versants du Meu, de la Chèze, de l'Aff ou encore le Canut.

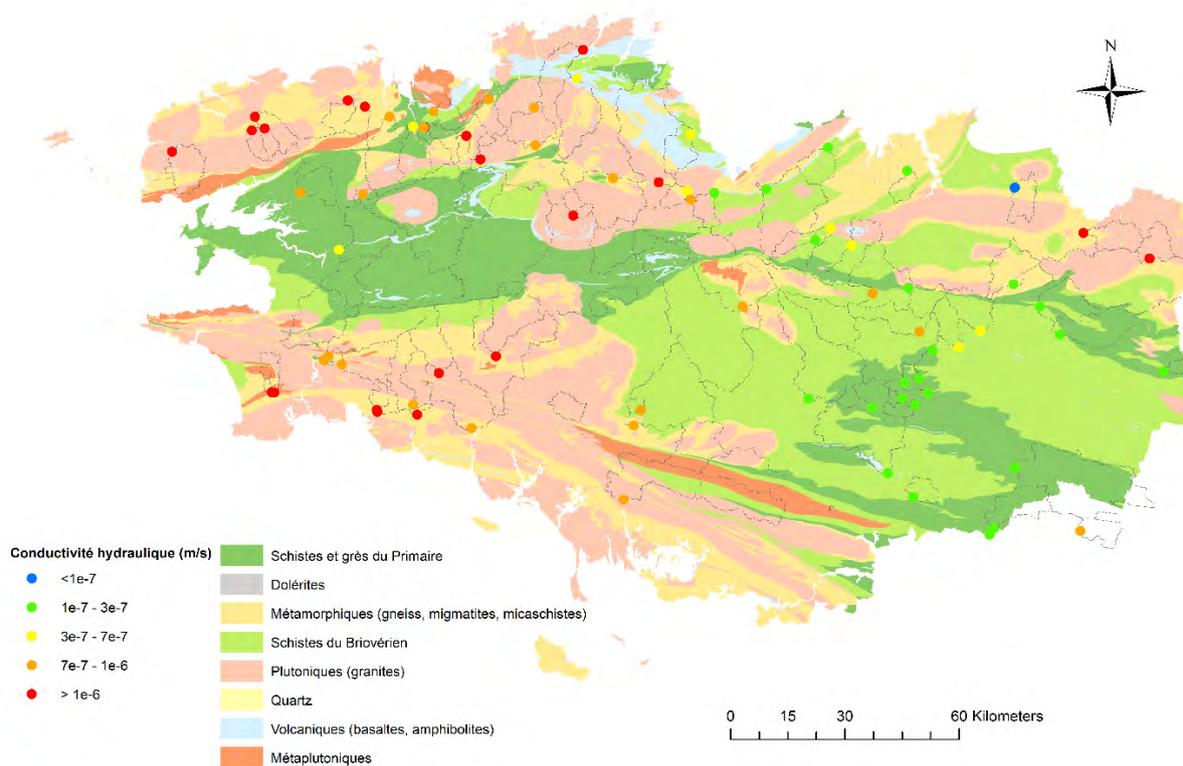


Figure 17. Cartographie régionale de la conductivité hydraulique estimée à l'échelle du bassin versant.

La corrélation entre les paramètres hydrauliques et les classes lithologiques a ensuite été étudiée quantitativement en regroupant les conductivités hydrauliques par classes lithologiques. Les boxplots représentés sur la Figure 18 permettent de différencier 2 groupes lithologiques aux propriétés hydrauliques différentes :

1. Un groupe associé aux conductivités hydrauliques les plus perméables avec pour classes lithologiques les plutoniques (i.e. les granites) et les roches métamorphiques (i.e. les gneiss, les migmatites, les micaschistes). La médiane de ce groupe est d'environ 1.10^{-6} m/s. La classe associée aux granites s'étend de $2.7.10^{-8}$ m/s (Guyoult) à 3.10^{-6} m/s (Aber Ildut) et présente ainsi 2 ordres de grandeurs en variabilité. La classe associée aux métamorphiques s'étend de 2.10^{-7} m/s (Yvel) à 3.10^{-6} m/s (Horn) et présente ainsi 1 ordre de grandeur en variabilité.
2. Un groupe associé aux conductivités hydrauliques les moins perméables avec pour classes lithologiques les schistes du briovérien et les schistes et grès du Primaire. La médiane de ce groupe est d'environ 3.10^{-7} m/s. La classe associée aux schistes du briovérien s'étend de 1.10^{-7} m/s (Aron) à 9.10^{-7} m/s (l'Odet à Ergue) et présente ainsi environ 1 ordre de grandeur en variabilité. La classe associée aux schistes et grès du Primaire s'étend de 1.10^{-7} m/s (Semnon) à 1.10^{-6} m/s (Tromorgant) et présente ainsi 1 ordre de grandeur en variabilité.

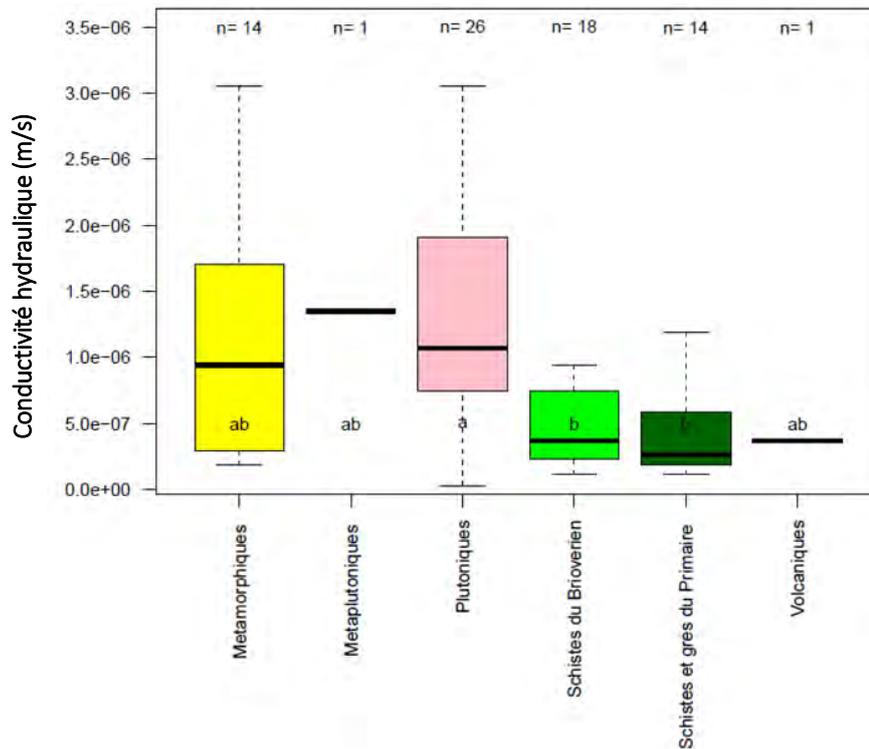


Figure 18. Influence de la lithologie sur la distribution des conductivités hydrauliques à l'échelle du bassin versant.

Les boxplots de corrélation entre les classes lithologiques et les temps caractéristiques sont présentés en Annexe IV présentant les mêmes tendances avec un groupe composé des classes plutoniques et métamorphiques et un second groupe composé des classes schistes du briovérien et schistes et grès du Primaire.

4.3 Explorations de paramètres hydrauliques

La quantification de la corrélation entre paramètres hydrauliques et classes lithologiques a permis d'identifier deux grands groupes lithologiques aux propriétés distinctes avec des médianes de 1.10^{-6} m/s et 3.10^{-7} m/s respectivement pour les groupes les plus perméables et les moins perméables soit un facteur 3 de variabilité. Cette corrélation a été obtenue à partir des conductivités hydrauliques estimées à partir de l'exploration de paramètres hydrauliques en utilisant le modèle hydrogéologique hs1D. Cette analyse a été approfondie pour estimer les incertitudes du modèle à estimer ces conductivités hydrauliques et pour acquérir des informations sur les processus permettant une différenciation en fonction de la lithologie. Pour cela la fonction objective (NSE_{log}) est explorée ainsi que les données de saturation.

4.3.1 Cartes NSE_{log}

L'exploration a été faite en faisant varier la conductivité hydraulique et la lame d'eau maximale et une fonction objective, le NSE_{log} , a permis d'estimer une conductivité hydraulique équivalente au bassin versant. Des cartes NSE_{log} ont ensuite été caractérisées, pour chaque bassin versant, en représentant la conductivité hydraulique et la lame d'eau maximale en fonction du NSE_{log} calculé (Figure 19). Ces observations ont permis l'identification de 3 cas aux comportements variables :

1. Cas type de l'Aber Plabennec (Figure 19a) : Concernant l'espace 1, les conductivités hydrauliques sont les plus perméables et les NSE_{log} sont environ équivalents à 0.8. Les conductivités hydrauliques sont moins perméables sur l'espace 2 que pour les autres cas et les NSE_{log} sont également environ de 0.8.
2. Cas type de la Mignonne (Figure 19b) : Ce cas est un intermédiaire, du point de vue des conductivités hydrauliques, entre le cas de l'Aber Plabennec (19a) et de l'Arguenon (19c) avec des NSE_{log} proches de ceux de l'Aber Plabennec.
3. Cas type de l'Arguenon (Figure 19c) : L'espace 1 est caractérisé par les conductivités hydrauliques les moins perméables et l'espace 2 est caractérisé les conductivités hydrauliques les plus perméables. Les NSE_{log} sont environ équivalents à 0.5 et sont globalement plus élevés sur l'espace de droite.

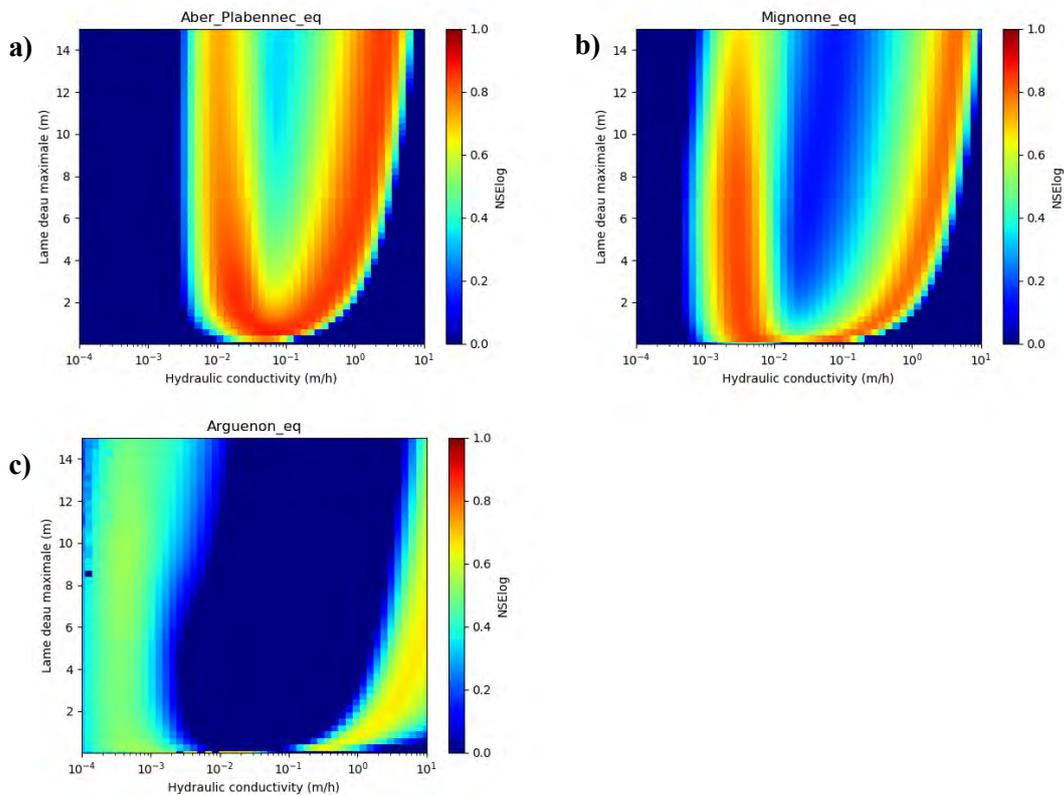


Figure 19. Comparaison des cartes NSE obtenues pour 3 cas types différents (a. Aber Plabennec : cas les plus perméables avec 2 espaces de paramètres optimaux bien développés et des NSE_{log} autour de 0.8; b. Mignonne : cas intermédiaire avec 2 espaces de paramètres optimaux développés et des NSE_{log} autour de 0.8; c. Arguenon : cas les moins perméables avec 2 espaces de paramètres optimaux peu développés et des NSE_{log} autour de 0.5).

4.3.2 Cartes d'aires moyennes saturées

Les cartes NSE_{log} ont ensuite été caractérisées selon le niveau de saturation. L'aire moyenne de saturation du versant équivalent est représentée Figure 20.

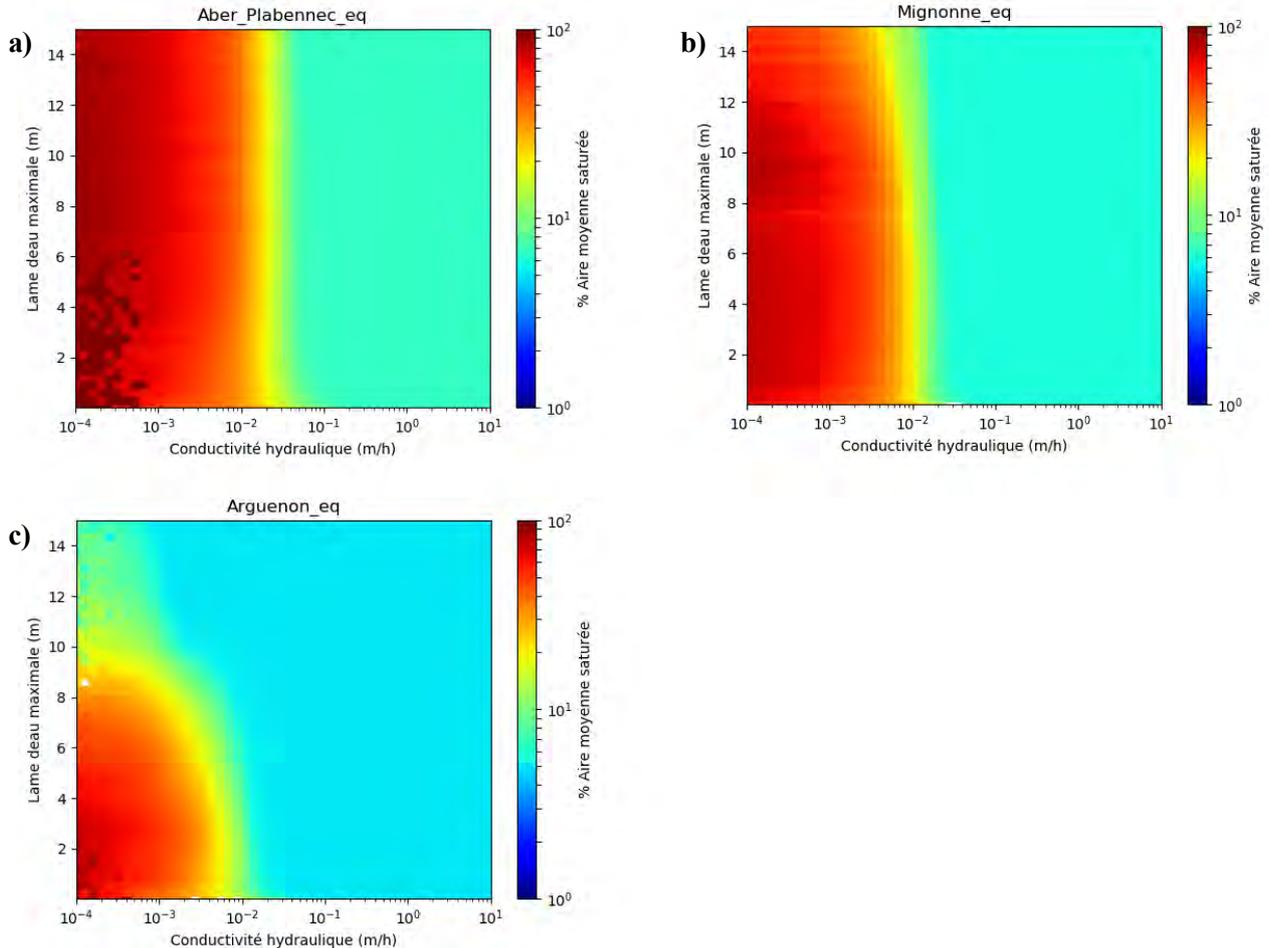


Figure 20. Comparaison des cartes des aires moyennes saturées obtenues pour 3 cas types différents (a. Aber Plabennec : cas les plus perméables avec 2 espaces de paramètres optimaux bien développés et des NSE_{log} autour de 0.8; b. Mignonne : cas intermédiaire avec 2 espaces de paramètres optimaux développés et des NSE_{log} autour de 0.8; c. Arguenon : cas les moins perméables avec 2 espaces de paramètres optimaux peu développés et des NSE_{log} autour de 0.5).

Sur les différentes cartes de saturation, une aire moyenne saturée inférieure à 5% est observable pour les conductivités hydrauliques les plus perméables. A l'inverse, pour les conductivités hydrauliques les moins perméables, une aire saturée supérieure à 40% est observable. De plus une zone intermédiaire avec une aire saturée moyenne d'environ 20% peut être caractérisée pour les différents cas avec une limite de conductivité hydraulique variable selon les cas. Cette zone intermédiaire est estimée à environ $2 \cdot 10^{-2}$ m/h, $1 \cdot 10^{-2}$ m/h et $6 \cdot 10^{-3}$ m/h respectivement pour les bassins versants de l'Aber Plabennec, de la Mignonne et de l'Arguenon. L'aire moyenne saturée de cette zone intermédiaire est également stable lorsque la lame d'eau maximale varie (à conductivité hydraulique fixe) pour les bassins versants de l'Aber Plabennec et de la Mignonne tandis qu'elle varie pour l'Arguenon.

4.3.3 Chroniques hydrologiques

Les données de saturation permettent d'interpréter les cartes NSE et de caractériser les 2 espaces de paramètres optimaux. Les chroniques hydrologiques ont également été utilisées dans cette optique. De plus elles permettent de visuellement comparer les données simulées à partir du modèle et les données observées en station hydrologique. La Figure 21 illustre les comportements de l'espace 1 (Figure 21a) et de l'espace 2 (Figure 21b) pour le bassin versant de l'Aber Plabennec.

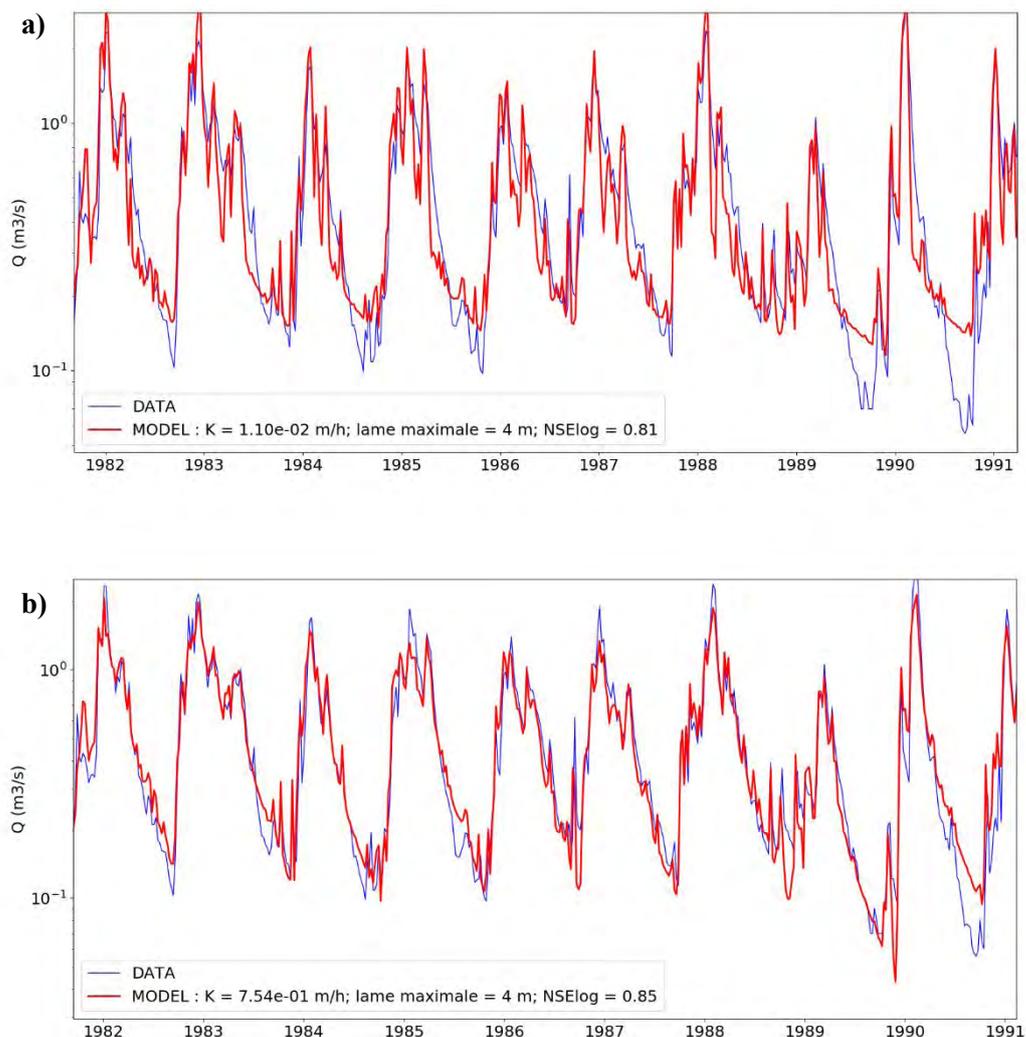


Figure 21. Comparaison des débits simulés (modèle hs1D) et des débits observés pour la station hydrologique de l'Aber Plabennec (en rouge : débits simulés; en bleu : débits observés). a) Espace de paramètre optimal 1; b) Espace de paramètre optimal 2.

Les périodes de récessions sont sous estimées par l'espace 1 qui surestime systématiquement les débits d'été. Les pics de crues sont relativement bien représentés. A l'inverse les pics de crues sont légèrement sous-estimés sur l'espace de droite et les périodes de récessions bien

représentées. Globalement la saisonnalité entre période de crues et période d'étiage est bien représentée ce qui permet d'obtenir des NSE supérieurs à 0.8.

La Figure 22 illustre les comportements de l'espace 1 (Figure 22a) et de l'espace 2 (Figure 22b) pour le bassin versant de l'Aber Plabennec.

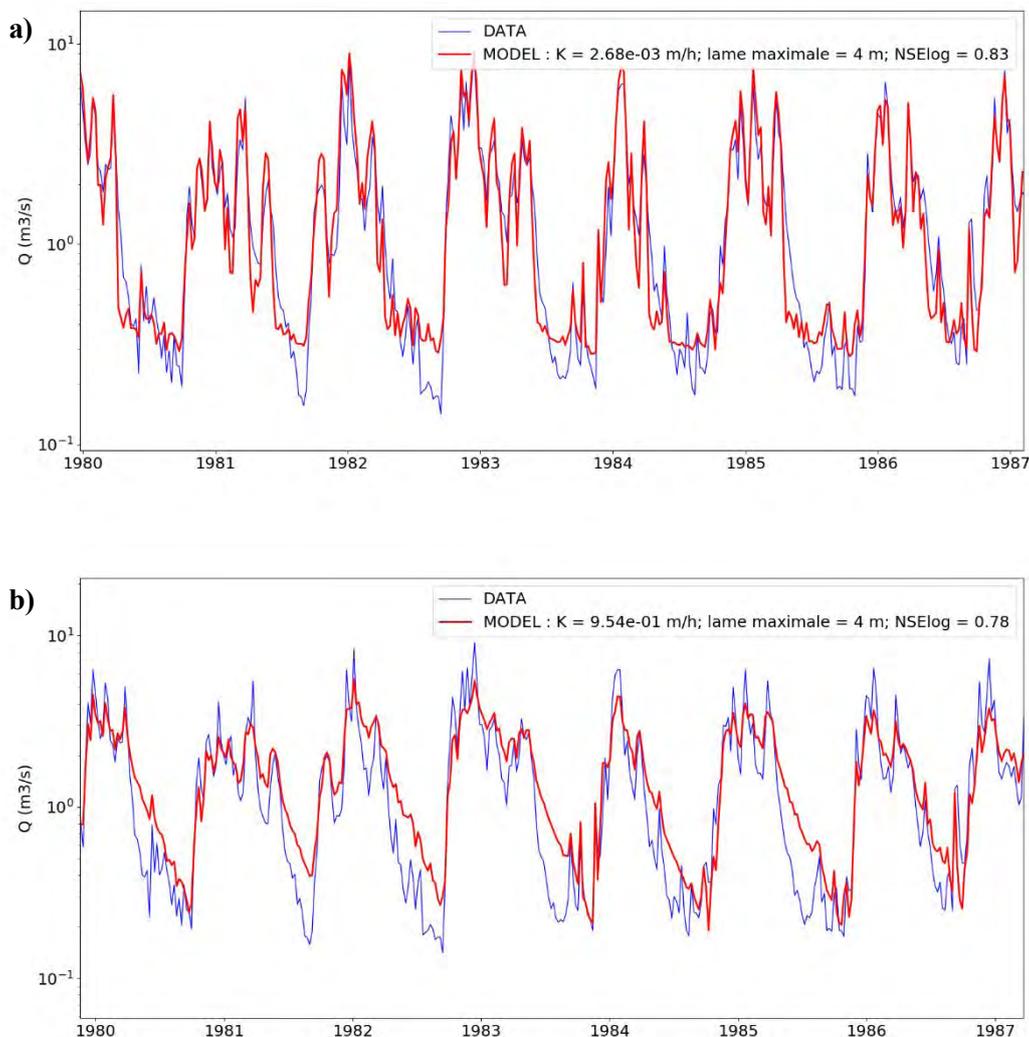


Figure 22. Comparaison des débits simulés (modèle hs1D) et des débits observés pour la station hydrologique de la Mignonne (en rouge : débits simulés; en bleu : débits observés). a) Espace de paramètre optimal 1; b) Espace de paramètre optimal 2.

Comme pour le bassin versant de l'Aber Plabennec, l'espace 1 surestime les débits en période de récession et représente globalement bien les pics de crues ainsi que la saisonnalité des événements hydrologiques. Cependant une différence est notable sur l'espace 2, la diminution du débit en période de récession est plus lente ne permettant pas de représenter correctement les processus de transfert du milieu souterrain au milieu superficiel.

La Figure 23 illustre les comportements de l'espace 1 (Figure 23a) et de l'espace 2 (Figure 23b) pour le bassin versant de l'Arguenon.

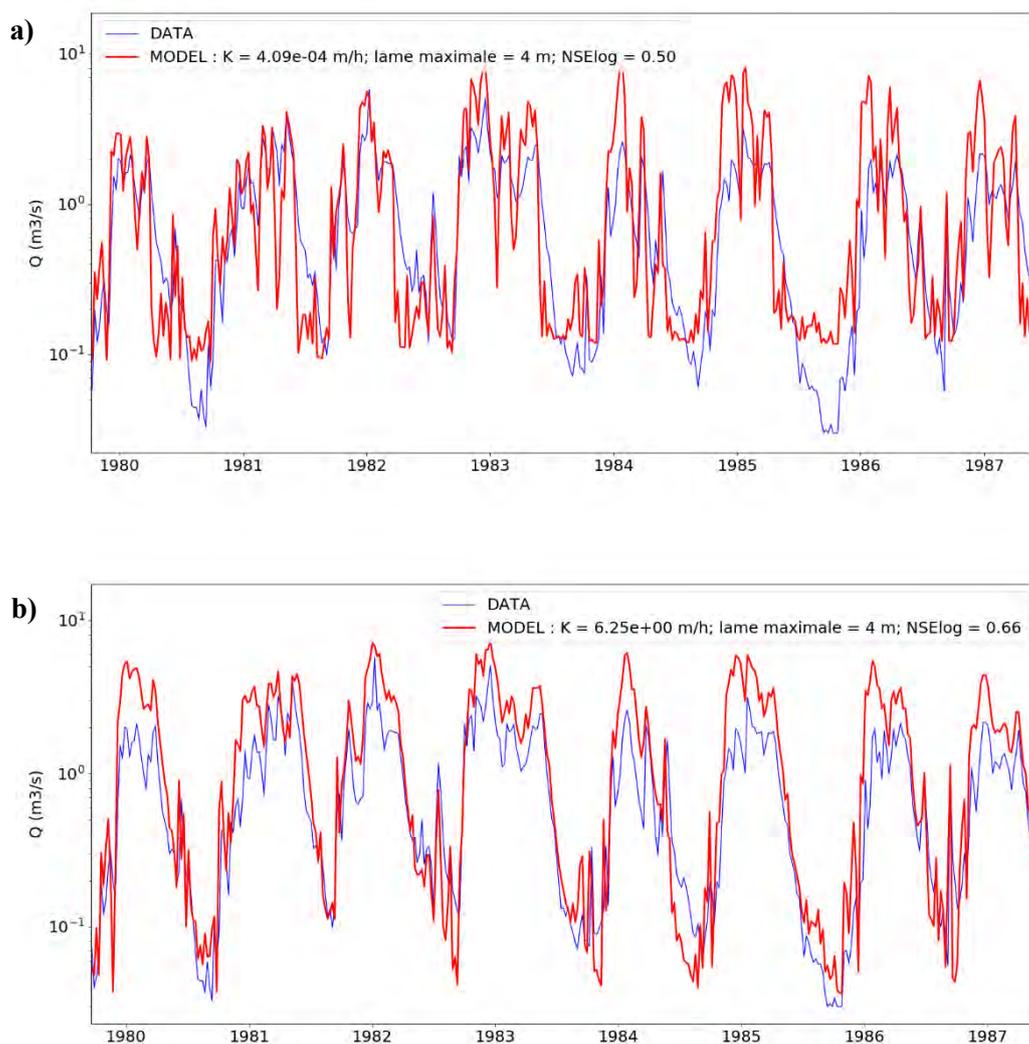


Figure 23. Comparaison des débits simulés (modèle hs1D) et des débits observés pour la station hydrologique de l'Arguenon (en rouge : débits simulés; en bleu : débits observés). a) Espace de paramètre optimal 1; b) Espace de paramètre optimal 2.

En complément des observations sur l'évènement hydrologique étant le mieux calé par les 2 espaces, une observation supplémentaire est identifiable concernant le bassin versant de l'Arguenon. Les variations de débits, que ce soit au niveau des observations en station ou en sortie de modèle, sont plus importantes que pour les bassins versant de l'Aber Plabennec et de la Mignonne. Ces variations importantes de débits induisent des NSE_{\log} moins élevés.

5 Discussions

5.1 Utilisation de la lithologie comme base de régionalisation

Une des premières étapes de la régionalisation de paramètres hydrauliques est la recherche d'une corrélation entre des paramètres hydrauliques et une caractéristique du paysage, en l'occurrence la lithologie. Cette corrélation permet de valider la méthode de régionalisation. 2 paramètres hydrauliques ont ainsi été testés : le temps caractéristique, estimé à partir de l'analyse des récessions et la conductivité hydraulique estimée à partir d'un modèle hydrogéologique. L'analyse statistique (ACP) a permis d'identifier les tendances de corrélation entre des caractéristiques du paysage et des paramètres hydrauliques. Les paramètres hydrauliques sont positivement corrélés aux classes lithologiques associées aux roches cristallines (plutoniques) et aux roches métamorphiques (ici gneiss, migmatites et micaschistes). Les paramètres hydrauliques sont également négativement corrélés aux classes associées aux schistes du briovérien. De plus, les paramètres hydrauliques sont également négativement corrélés à l'épaisseur des altérites. Ces observations sont en adéquation avec les observations du projet SILURES (Mougin et al. 2008). En effet il a été montré que l'importance de l'écoulement souterrain, i.e. un proxy des propriétés hydrodynamiques, est positivement corrélée au pourcentage de granite et négativement corrélée au pourcentage de schistes du Briovérien et au pourcentage d'altérites. Cette analyse statistique avait permis d'identifier 3 groupes de bassins versants : 1) Les bassins versants granitiques et/ou métamorphiques avec altérites, à écoulement souterrain important; 2) Les bassins versants avec plus ou moins de schistes du Primaire sans altérites, à écoulement souterrain important et 3) les bassins versant schisteux du Briovérien avec plus ou moins d'altérites, à écoulement souterrain faible (Mougin et al. 2008).

La corrélation entre les classes lithologiques et les paramètres hydrauliques a ensuite été quantifiée en identifiant une lithologie dominante par bassin versant et en regroupant les paramètres hydrauliques effectifs des bassins versants par classes lithologiques. La médiane des conductivités hydrauliques associées aux classes plutoniques est de 1.10^{-6} m/s avec une variabilité de 2 ordres de grandeurs tandis que la médiane des conductivités hydrauliques associées aux schistes est de 3.10^{-7} m/s avec une variabilité d'un ordre de grandeur. Ainsi entre les différents groupes lithologiques significativement différents, il existe une variabilité d'un facteur 3 entre la médiane de ces conductivités hydrauliques. Au maximum, il existe une variabilité de 2 ordres de grandeur entre les conductivités hydrauliques minimales et maximales effectives des bassins versants à l'échelle de la Bretagne. Ce résultat est surprenant puisque la conductivité hydraulique peut varier de plus de 12 ordres de grandeur entre les différentes classes lithologiques tandis qu'ici elle est en moyenne seulement 3 fois plus élevée pour les granites que pour les schistes (Hsieh, 1998). Cependant, cette variabilité semble diminuer avec le changement d'échelle (Clauser, 1992).

De plus la hiérarchie entre les 2 classes lithologiques est inverse à celle trouvée par Vannier et al. (2013) avec des schistes (entre 10 000 et 30 000 mm/h) significativement plus perméables aux granites (entre 250 et 4500 mm/h). Cette différence peut s'expliquer par le type de processus mis en œuvre. En effet Vannier et al. (2013) considère la vidange de l'aquifère comme processus unique tandis que l'interception de la nappe avec la surface en plus de la

vidange des aquifères sont considérés dans cette étude. En considérant l'espace 2 et non l'espace 1 des cartes NSE_{log} , la hiérarchie entre les schistes et les granites serait la même que dans Vannier et al. (2013) avec des conductivités proches des 10^{-3} m/s. Cela peut s'expliquer par le fait que la contribution souterraine des roches cristallines est potentiellement plus importante que pour les schistes comme suggéré par Mougin et al. (2008). Ainsi pour représenter l'écoulement rapide caractéristique des classes lithologiques associées aux schistes, il faut soit une perméabilité très importante (vidange très forte) ou soit un milieu imperméable ce qui crée un écoulement de surface par excès de saturation ayant un temps de transfert plus court que celui de l'eau souterraine. A l'inverse, les classes associées aux granites ont potentiellement besoin d'un écoulement souterrain plus modéré (si uniquement processus de vidange) et d'un milieu plus perméable en cas de prise en compte de l'interception de la nappe avec la surface. L'hypothèse d'un écoulement de surface plus rapide et plus important pour les classes associées aux schistes semble également se vérifier à travers l'observation des chroniques hydrologiques. En effet pour le bassin versant de l'Arguenon, bassin associé aux schistes, les variations de débits sont plus importantes que pour le bassin versant de l'Aber Plabennec, bassin associé aux granites suggérant une contribution de l'écoulement superficiel plus importante.

Cependant certaines incertitudes demeurent sur le contrôle de la lithologie sur le système hydrodynamique à l'échelle du bassin versant. En effet la méthode d'identification de la lithologie majoritaire a été simplifiée et ne prend pas en compte la proportion de la surface de chaque lithologie recouverte par le bassin versant. Cette pondération par la surface permettrait potentiellement d'estimer des conductivités hydrauliques plus représentatives des classes lithologiques. Enfin, il est difficile de mettre en évidence une hétérogénéité géologique en affectant une seule valeur de conductivité hydraulique par bassin versant au cours de l'exploration de paramètre. En effet, Matonse and Kroll (2009) ont montré que le partitionnement du bassin versant en versant et l'affectation de plusieurs conductivités hydrauliques permettaient de mieux capturer l'hétérogénéité géologique.

5.2 Incertitudes liées à l'estimation des paramètres hydrauliques.

La section précédente a permis de montrer la variabilité existante entre les différentes classes lithologiques concernant les propriétés hydrauliques et leur hiérarchie suivant leur ordre de grandeur. Il a été montré que les résultats de l'ACP étaient en adéquation avec les résultats de Mougin et al. (2008) proposant 3 groupes de bassins versants aux lithologies différentes et à contributions des écoulements souterrains variables. Ces 3 groupes ont été investigués à partir du modèle d'écoulement souterrain hs1D permettant d'obtenir des informations sur les propriétés hydrauliques, sur la capacité du modèle à les simuler ainsi que sur les données de saturation.

Les cartes NSE_{log} permettent d'identifier 2 espaces de paramètres optimaux systématiques pour l'ensemble des bassins versants. Les conductivités hydrauliques de ces espaces varient selon la classe lithologique. Les granites étant principalement associés aux conductivités hydrauliques les plus perméables et les schistes étant principalement associés aux conductivités hydrauliques les moins perméables. De plus, les bassins versants associés aux

granites ont des NSE_{log} proches de 0.8 tandis que les bassins versants associés aux schistes ont des NSE_{log} proches de 0.5. Mougin et al. (2008) concluent que les granites sont associés à une contribution de l'écoulement souterrain importante et les schistes à une contribution de l'écoulement souterrain faible et par conséquent un écoulement principalement superficiel. On peut ainsi émettre l'hypothèse que les différences de NSE_{log} sont associées à la capacité du modèle à mieux reproduire l'écoulement souterrain plutôt que l'écoulement superficiel uniquement représenté par un processus de suintement avec une interception de la nappe à la surface. Les modèles sont considérés corrects lorsque le NSE_{log} est supérieur à 0.75 (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013). Par conséquent, l'estimation de la conductivité hydraulique pour les bassins versants principalement associés aux schistes, présentant un NSE_{log} moyen environ égal à 0.5, est soumise à de fortes incertitudes. Ces incertitudes conditionnent fortement la corrélation entre les classes lithologiques et les paramètres hydrauliques. Ainsi les incertitudes sur l'estimation de la conductivité hydraulique induisent des incertitudes sur la variabilité et l'hétérogénéité entre les différentes classes lithologiques.

De plus, le choix de l'espace de paramètres optimale est déterminant dans l'estimation d'un paramètre hydraulique. En effet il a été montré dans la section précédente que la hiérarchie de conductivités hydrauliques entre les classes lithologiques était inversée selon le choix de l'espace optimal. Le NSE_{log} reste constant à conductivité hydraulique fixe et à lame d'eau maximale variable pour l'espace 1. On peut ainsi émettre, dans ce cas-là, l'hypothèse que la conductivité hydraulique contrôle le flux. Cela peut notamment intervenir sur l'apparition ou non d'une zone de suintement. Sur l'espace 2, le NSE_{log} reste constant proportionnellement à l'augmentation de la conductivité hydraulique et l'augmentation de la lame d'eau maximale. On peut ainsi émettre, dans ce cas-là, l'hypothèse que la diffusivité contrôle le flux plutôt représentatif d'une vidange d'un aquifère. Ces 2 espaces ont été caractérisés suivant leur aire moyenne de saturation. Si les aires moyennes de saturation sont inférieures à 5% pour chaque groupe lithologique pour l'espace 2, les aires moyennes de saturation sont supérieures à 10% et peuvent aller jusqu'à 50% pour l'espace 1. L'utilisation des cartes de probabilités de zones humides par Berthier et al. (2014) à l'ensemble des bassins versants permettrait de mettre en lien ces données d'aires moyennes de saturation et d'acquérir de plus amples connaissances sur la cohérence ou non de ces 2 espaces de paramètres optimaux. Cette étape est déterminante dans le choix de l'espace à conserver pour l'estimation de la conductivité hydraulique et dans la connaissance des processus dominants contrôlant le flux. Courtois (2019) conclut, à partir d'une expérimentation sur le Ris, que l'espace 1 est le plus cohérent par rapport à l'espace de 2 à partir de la carte des probabilités des zones humides. En effet, pour le bassin versant du Ris, il existe une surface d'environ 10% de zones humides correspondante à une conductivité hydraulique de 10^{-1} m/h, trop élevée pour être dans l'espace 2. Cette analyse doit être systématisée sur l'ensemble des bassins versants.

6 Conclusions & Perspectives

La régionalisation de paramètres hydrauliques estimés à l'échelle du bassin versant sur la base de la lithologie, pour les aquifères de socles cristallins, est l'objectif principal de la thèse. Cet objectif permet de répondre à un manque de données des paramètres hydrauliques à cette échelle d'intérêt. L'hypothèse générale est que la lithologie peut servir de base pour l'extrapolation spatiale des paramètres hydrauliques car elle contrôle majoritairement le régime hydrodynamique des bassins versants. Une méthodologie basée sur l'identification des classes lithologiques et sur l'estimation de paramètres hydrauliques a donc été mise en place. Cette méthodologie a ensuite été suivie par une analyse statistique permettant de mettre en évidence la corrélation forte entre ces deux paramètres par rapport au contrôle de paramètres géomorphologiques et l'hétérogénéité existante des propriétés hydrauliques à cette échelle d'intérêt. Plusieurs résultats notables sont identifiables :

1. Le pourcentage de roches cristallines (granites) et le pourcentage de roches métamorphiques (gneiss, migmatites et micaschistes) sont positivement corrélés aux paramètres hydrauliques (conductivité hydraulique et temps caractéristique de récessions).
2. Le pourcentage de schistes du Briovérien est négativement corrélé aux paramètres hydrauliques.
3. Les classes lithologiques associées aux granites (plutoniques) et aux roches métamorphiques sont significativement différentes de celles associées aux schistes du Briovérien et aux schistes et grès du Primaire avec des médianes de conductivités hydrauliques respectives de 1.10^{-6} m/s et 3.10^{-7} m/s soit un facteur 3 de variabilité.
4. L'ajout d'un processus (i.e. l'interception de la nappe à la surface) diminue de plusieurs ordres de grandeurs l'estimation de la conductivité hydraulique et inverse la hiérarchie entre les différentes classes lithologiques.
5. Les classes associées aux granites ont besoin d'un écoulement globalement plus lent que celui de celles associées aux schistes pour représenter la chronique hydrologique.

Pour confirmer l'hypothèse que la lithologie est le facteur dominant de la répartition des propriétés hydrauliques à l'échelle du bassin versant et afin d'investiguer les incertitudes et biais existants, plusieurs perspectives sont proposées :

1. Dans une optique de régionalisation, la corrélation entre les classes lithologiques et les paramètres hydrauliques (médiane et dispersion) doit être validée sur un site d'étude différent présentant un contexte géologique similaire (e.g. le Massif Central en France). Cette validation doit se faire sur des stations jaugées avant de pouvoir extrapoler aux stations non jaugées dans un contexte de roches cristallines.
2. Le partitionnement du versant équivalent en plusieurs versants équivalents représentatifs de la diversité lithologique du bassin versant permettrait d'améliorer la fiabilité de l'estimation des gammes de propriétés hydrauliques des différentes classes lithologiques. En intégrant une hétérogénéité géologique dans le modèle, l'objectif est également d'affiner le nombre de classes lithologiques nécessaire à la représentation des différents comportements observables et potentiellement de représenter les récessions les plus extrêmes non représentées par le modèle actuellement.

3. La décorrélation du climat avec la géologie sera investiguée à travers l'effet du remplissage initial de l'aquifère sur la variabilité des récessions. Cela permet de comprendre si la répartition spatiale des conductivités hydrauliques est liée majoritairement à la recharge et à l'évapotranspiration ou plutôt à la classe lithologique.
4. L'étude systématique des cartes de probabilités de zones humides doit permettre de valider définitivement la méthode d'estimation des conductivités hydrauliques à partir du modèle hs1D. Cette étude peut être complétée par l'observation et l'analyse des profils de charges piézométriques en sortie de modèle.

Références

- Achtziger- Zupančič, P., Loew, S., Mariéthoz, G., 2017. A new global database to improve predictions of permeability distribution in crystalline rocks at site scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 122, 3513–3539. <https://doi.org/10.1002/2017JB014106>
- Ahmed, S., Marsily, G.D., 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resources Research* 23, 1717–1737. <https://doi.org/10.1029/WR023i009p01717>
- Anderson, R.S., Anderson, S.P., 2010. *Geomorphology: The Mechanics and Chemistry of Landscapes*. Cambridge University Press.
- Arnell, N.W., van Vuuren, D.P., Isaac, M., 2011. The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources. *Global Environmental Change* 21, 592–603. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.01.015>
- Banks, E.W., Simmons, C.T., Love, A.J., Cranswick, R., Werner, A.D., Bestland, E.A., Wood, M., Wilson, T., 2009. Fractured bedrock and saprolite hydrogeologic controls on groundwater/surface-water interaction: a conceptual model (Australia). *Hydrogeol J* 17, 1969–1989. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0490-7>
- Banwart, S., Gustafsson, E., Laaksoharju, M., Nilsson, A.-C., Tullborg, E.-L., Wallin, B., 1994. Large-scale intrusion of shallow water into a vertical fracture zone in crystalline bedrock: Initial hydrochemical perturbation during tunnel construction at the Äspö Hard Rock Laboratory, southeastern Sweden. *Water Resources Research* 30, 1747–1763. <https://doi.org/10.1029/94WR00155>
- Basso, S., Schirmer, M., Botter, G., 2015. On the emergence of heavy-tailed streamflow distributions. *Advances in Water Resources* 82, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.04.013>
- Belleguic, K., Conseil, C., Eveno, T., Lorge, S., Baraer, F., 2012. Le changement climatique en Bretagne.
- Berthier, L. et al., 2014. Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France, INRA et AgroCampus Ouest. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie http://geowww.agrocampus-ouest.fr/metadata/pdf/Notice_MPH_France-1.pdf (accessed 9.30.20).
- Bevillon, C., Thomas, A., 2016. Les enjeux de l'eau en Bretagne à l'horizon 2040. Contribution du CESER à la démarche prospective du Conseil régional pour l'élaboration du Plan breton pour l'eau.
- Bierkens, M.F.P., 2015. Global hydrology 2015: State, trends, and directions. *Water Resources Research* 51, 4923–4947. <https://doi.org/10.1002/2015WR017173>
- Blöschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes* 9, 251–290. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305>

- Boé, J., 2013. Modulation of soil moisture–precipitation interactions over France by large scale circulation. *Clim Dyn* 40, 875–892. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1380-6>
- Boisson, A., Baïssset, M., Alazard, M., Perrin, J., Villesseche, D., Dewandel, B., Kloppmann, W., Chandra, S., Picot-Colbeaux, G., Sarah, S., Ahmed, S., Maréchal, J.C., 2014a. Comparison of surface and groundwater balance approaches in the evaluation of managed aquifer recharge structures: Case of a percolation tank in a crystalline aquifer in India. *Journal of Hydrology* 519, 1620–1633. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.022>
- Boisson, A., Baïssset, M., Alazard, M., Perrin, J., Villesseche, D., Dewandel, B., Kloppmann, W., Chandra, S., Picot-Colbeaux, G., Sarah, S., Ahmed, S., Maréchal, J.C., 2014b. Comparison of surface and groundwater balance approaches in the evaluation of managed aquifer recharge structures: Case of a percolation tank in a crystalline aquifer in India. *Journal of Hydrology* 519, 1620–1633. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.022>
- Boisson, A., Guihéneuf, N., Perrin, J., Bour, O., Dewandel, B., Dausse, A., Viossanges, M., Ahmed, S., Maréchal, J.C., 2015. Determining the vertical evolution of hydrodynamic parameters in weathered and fractured south Indian crystalline-rock aquifers: insights from a study on an instrumented site. *Hydrogeol J* 23, 757–773. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1226-x>
- Boussinesq, J., 1877. *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Impr. nationale.
- Boutt, D.F., Diggins, P., Mabee, S., 2010. A field study (Massachusetts, USA) of the factors controlling the depth of groundwater flow systems in crystalline fractured-rock terrain. *Hydrogeol J* 18, 1839–1854. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0640-y>
- Brutsaert, W., Nieber, J.L., 1977. Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. *Water Resources Research* 13, 637–643. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00637>
- Buttle, J.M., Eimers, M.C., 2009. Scaling and physiographic controls on streamflow behaviour on the Precambrian Shield, south-central Ontario. *Journal of Hydrology* 374, 360–372. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.036>
- Chen, X., Kumar, M., Basso, S., Marani, M., 2018. On the effectiveness of recession analysis methods for capturing the characteristic storage-discharge relation: An intercomparison study (preprint). *Catchment hydrology/Modelling approaches*. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-65>
- Cheng, Q., Ko, C., Yuan, Y., Ge, Y., Zhang, S., 2006. GIS modeling for predicting river runoff volume in ungauged drainages in the Greater Toronto Area, Canada. *Computers & Geosciences, Spatial Modeling for Environmental and Hazard Management* 32, 1108–1119. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.005>
- Chilton, P.J., Foster, S.S.D., 1995. Hydrogeological Characterisation And Water-Supply Potential Of Basement Aquifers In Tropical Africa. *Hydrogeology Journal* 3, 36–49. <https://doi.org/10.1007/s100400050061>
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, R., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.K., Laprise, R., Magana Rueda, V., Mearns, L., Menendez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., Arritt, R., Benestad, R., Beniston, M., Bromwich, D., Caya, D., Comiso, J., de Elia, R., Dethloff, K., 2007. Regional climate projections [WWW Document]. *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working*

- group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, University Press, Cambridge, Chapter 11. URL <https://epic.awi.de/id/eprint/17617/> (accessed 9.30.20).
- Clark, M.P., Rupp, D.E., Woods, R.A., Meerveld, H.J.T., Peters, N.E., Freer, J.E., 2009. Consistency between hydrological models and field observations: linking processes at the hillslope scale to hydrological responses at the watershed scale. *Hydrological Processes* 23, 311–319. <https://doi.org/10.1002/hyp.7154>
- Clauser, C., 1992. Permeability of crystalline rocks. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 73, 233–238. <https://doi.org/10.1029/91EO00190>
- Colmet-Daage, A., Sanchez-Gomez, E., Ricci, S., Llovel, C., Borrell Estupina, V., Quintana-Seguí, P., Llasat, M.C., Servat, E., 2018. Evaluation of uncertainties in mean and extreme precipitation under climate change for northwestern Mediterranean watersheds from high-resolution Med and Euro-CORDEX ensembles. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 673–687. <https://doi.org/10.5194/hess-22-673-2018>
- Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., Bougaïré, F.D., Somé, S., Tapsoba, A., 2010. Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso. *Groundwater* 48, 269–283. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00620.x>
- Courtois, Q., 2019. Ressources en eau et transferts de solutés dans les zones altérées superficielles des régions de socle (These de doctorat). Rennes 1.
- De Marsily, G., Lavedan, G., Boucher, M., Fasamino, G., 1984. Interpretation of interference tests in a well field using geostatistical techniques to fit the permeability distribution in a reservoir model. Presented at the Geostatistics for natural resources characterization. NATO advanced Study Institute, pp. 831–849.
- DesRoches, A., Danielescu, S., Butler, K., 2014. Structural controls on groundwater flow in a fractured bedrock aquifer underlying an agricultural region of northwestern New Brunswick, Canada. *Hydrogeol J* 22, 1067–1086. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1134-0>
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C., Krishnamurthy, N.S., 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology* 330, 260–284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026>
- Dewandel, B., Maréchal, J.C., Bour, O., Ladouche, B., Ahmed, S., Chandra, S., Pauwels, H., 2012. Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and effective porosity at watershed scale in deeply weathered crystalline aquifers. *Journal of Hydrology* 416–417, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.038>
- Gleeson, T., Moosdorf, N., Hartmann, J., Beek, L.P.H. van, 2014. A glimpse beneath earth's surface: GLObal HYdrogeology MaPS (GLHYMPS) of permeability and porosity. *Geophysical Research Letters* 41, 3891–3898. <https://doi.org/10.1002/2014GL059856>
- Gleeson, T., Smith, L., Moosdorf, N., Hartmann, J., Dürr, H.H., Manning, A.H., Beek, L.P.H. van, Jellinek, A.M., 2011. Mapping permeability over the surface of the Earth. *Geophysical Research Letters* 38. <https://doi.org/10.1029/2010GL045565>

- Harrelson, C.C., 1994. Stream Channel Reference Sites: An Illustrated Guide to Field Technique. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.
- Heuvelmans, G., Muys, B., Feyen, J., 2006. Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology* 319, 245–265. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.030>
- Hsieh, P.A., 1998. Scale effects in fluid flow through fractured geologic media 335–353. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511551864.013>
- Ingebritsen, S.E., Manning, C.E., 1999. Geological implications of a permeability-depth curve for the continental crust. *Geology* 27, 1107–1110. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<1107:GIOAPD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<1107:GIOAPD>2.3.CO;2)
- IPCC, 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.), Core Writing Team. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 104.
- Jiao, J.J., Wang, X.-S., Nandy, S., 2005. Confined groundwater zone and slope instability in weathered igneous rocks in Hong Kong. *Engineering Geology* 80, 71–92. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.04.002>
- Karlsen, R.H., Bishop, K., Grabs, T., Ottosson-Löfvenius, M., Laudon, H., Seibert, J., 2019. The role of landscape properties, storage and evapotranspiration on variability in streamflow recessions in a boreal catchment. *Journal of Hydrology* 570, 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.065>
- Kokkonen, T.S., Jakeman, A.J., Young, P.C., Koivusalo, H.J., 2003. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological Processes* 17, 2219–2238. <https://doi.org/10.1002/hyp.1329>
- Kundzewicz, Z.W., Döll, P., 2009. Will groundwater ease freshwater stress under climate change? *Hydrological Sciences Journal* 54, 665–675. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.4.665>
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Doll, P., Kabat, P., Jimenez, B., Miller, K., Oki, T., Zekai, S. and Shiklomanov, I., 2007. Freshwater resources and their management. In: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. and Hanson, C. E. (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 173-210. ISBN 9780521880091
- Lamy, C., 2013. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne 287.
- Le Borgne, T., Bour, O., Paillet, F.L., Caudal, J.-P., 2006. Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in a fractured aquifer. *Journal of Hydrology* 328, 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.029>

- Le Moigne, T., 2012. SURFEX scientific documentation. Note de centre (CNRM/GMME), Météo-France, Toulouse, France 237.
- Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., Kaspar, F., 2006. Estimating the Impact of Global Change on Flood and Drought Risks in Europe: A Continental, Integrated Analysis. *Climatic Change* 75, 273–299. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-6338-4>
- Liu, W., Lim, W.H., Sun, F., Mitchell, D., Wang, H., Chen, D., Bethke, I., Shiogama, H., Fischer, E., 2018. Global Freshwater Availability Below Normal Conditions and Population Impact Under 1.5 and 2 °C Stabilization Scenarios. *Geophysical Research Letters* 45, 9803–9813. <https://doi.org/10.1029/2018GL078789>
- Marçais, J., de Dreuzy, J.-R., Erhel, J., 2017. Dynamic coupling of subsurface and seepage flows solved within a regularized partition formulation. *Advances in Water Resources* 109, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.008>
- Maréchal, J.-C., Wyns, R., Lachassagne, P., Subrahmanyam, K., 2004. Vertical anisotropy of hydraulic conductivity in the fissured layer of hard-rock aquifers due to the geological structure of weathering profiles. *Journal of the Geological Society of India* 63, 545–550.
- Matonse, A.H., Kroll, C., 2009. Simulating low streamflows with hillslope storage models. *Water Resources Research* 45. <https://doi.org/10.1029/2007WR006529>
- Merz, R., Blöschl, G., 2004. Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology* 287, 95–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.028>
- Mohamoud, Y.M., 2008. Prediction of daily flow duration curves and streamflow for ungauged catchments using regional flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal* 53, 706–724. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.4.706>
- Mougin, B., Allier, D., Blanchin, R., Carn, A., Courtois, N., Gateau, C., Putot, E., 2008. SILURES Bretagne: Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines. Rapport du BRGM 131.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Paillet, F.L., 1998. Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations. *Water Resources Research* 34, 997–1010. <https://doi.org/10.1029/98WR00268>
- Post, D.A., Jakeman, A.J., 1999. Predicting the daily streamflow of ungauged catchments in S.E. Australia by regionalising the parameters of a lumped conceptual rainfall-runoff model. *Ecological Modelling* 123, 91–104. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00125-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00125-8)
- Price, K., 2011. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 35, 465–492. <https://doi.org/10.1177/0309133311402714>
- Rabu, D., Chantraine, J., Bechenec, F., 2001. Carte géologique du Massif Armoricaïn à 1/ 250 000. BRGM.

- Razack, M., Lasm, T., 2006. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology* 325, 164–178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.014>
- Razavi, T., Coulibaly, P., 2013. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering* 18, 958–975. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000690](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690)
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology* 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Roques, C., Bour, O., Aquilina, L., Dewandel, B., 2016. High-yielding aquifers in crystalline basement: insights about the role of fault zones, exemplified by Armorican Massif, France. *Hydrogeol J* 24, 2157–2170. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1451-6>
- Roques, C., Rupp, D.E., Selker, J.S., 2017. Improved streamflow recession parameter estimation with attention to calculation of $-dQ/dt$. *Advances in Water Resources* 108, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.07.013>
- Rupp, D.E., Uribe, H., Lagos, O., Selker, J.S., 2004. Recession Flow Analysis for Selection of a Basin Drainage Model and Estimation of Basin-Wide Hydraulic Parameters. AGU Fall Meeting Abstracts 11, H11F-0344.
- SANDRE, 2006. Banque nationale de donnée pour l'hydrométrie et l'hydrologie. Banque Hydro, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, Paris [WWW Document]. URL <http://www.hydro.eaufrance.fr/> (accessed 9.30.20).
- Schwanghart, W., Kuhn, N.J., 2010. TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis. *Environmental Modelling & Software* 25, 770–781. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.12.002>
- Sefton, C.E.M., Howarth, S.M., 1998. Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. *Journal of Hydrology* 211, 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00163-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00163-2)
- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., 1999. Fractures and discontinuities, in: Singhal, B.B.S., Gupta, R.P. (Eds.), *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 13–35. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9208-6_2
- Smakhtin, V.U., 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* 240, 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
- Stoelzle, M., Stahl, K., Weiler, M., 2013. Are streamflow recession characteristics really characteristic? *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 817–828. <https://doi.org/10.5194/hess-17-817-2013>
- Tallaksen, L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology* 165, 349–370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- Vannier, O., Braud, I., Anquetin, S., 2014. Regional estimation of catchment-scale soil properties by means of streamflow recession analysis for use in distributed hydrological models. *Hydrological Processes* 28, 6276–6291. <https://doi.org/10.1002/hyp.10101>

- Wyns, R., Baltassat, J.-M., Lachassagne, P., Legchenko, A., Vairon, J., Mathieu, F., 2004. Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la Société Géologique de France* 175, 21–34. <https://doi.org/10.2113/175.1.21>
- Young, A.R., 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology, The model parameter estimation experiment* 320, 155–172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.017>

Liste des Figures

Figure 1. Répartition mondiale des aquifères de socles cristallins (Singhal and Gupta, 1999). -----	1
Figure 2. Structure des écoulements et profil d'altération dans les aquifères de socles cristallins (Wyns et al. 2004). -----	2
Figure 3. Répartition spatiale du cumul annuel des précipitations en Bretagne (Belleguic, 2012). -----	8
Figure 4. Partitionnement des précipitations entre le milieu superficiel et le milieu souterrain. -----	9
Figure 5. Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentaire des rivières pour la région Bretagne (Mougin et al. 2008) -----	10
Figure 6. Comparaison de deux chroniques hydrologiques (a. Arguenon; b. Horn) mettant en évidence la variabilité de comportements à l'échelle de la saison et à l'échelle de la récession. -----	11
Figure 7. Répartition géographique des stations hydrologiques sans anthropisation majeure permettant de caractériser le milieu naturel. -----	13
Figure 8. Carte de la lithologie simplifiée du Massif Armoricaïn (Mougin et al. 2008). -----	14
Figure 9. Modèle numérique de terrain de la Bretagne à une résolution de 50m. -----	15
Figure 10. Schéma du modèle hydrogéologique de versants hs1D (Courtois, 2019). -----	18
Figure 11. Décomposition du bassin versant en versants (Courtois, 2019). -----	19
Figure 12. Représentation schématique des différents types de flux à l'échelle du versant pour des aquifères libres de faible épaisseur (Courtois, 2019). -----	20
Figure 13. Schéma d'intégration du débit dans la rivière (bleu) à partir des contributions des différents points (A, B, C) et versants (A ₁ , A ₂ , A ₃ , B ₁ , B ₂ , B ₃) (Courtois, 2019). -----	20
Figure 14. Hypothèses de structure de l'horizon superficiel perméable des massifs cristallins en Bretagne. Schéma selon l'hypothèse a) de fond plat et b) d'épaisseur constante (Courtois, 2019). -----	21
Figure 15. Illustration de la méthode d'estimation de la conductivité hydraulique à partir de l'exploration de paramètres sur un versant équivalent. Les 2 espaces de paramètres optimaux sont représentés en 1 pour les conductivités hydrauliques les moins perméables et en 2 pour les conductivités hydrauliques les plus perméables. En noir sont représentés les NSElog optimaux pour les couples lame d'eau maximale et conductivité hydraulique de l'espace 1. La flèche blanche illustre l'estimation de la conductivité hydraulique équivalente par la médiane des NSElog optimaux de l'espace 1. -----	22
Figure 16. Représentation graphique de l'analyse en composantes principales. -----	25
Figure 17. Cartographie régionale de la conductivité hydraulique estimée à l'échelle du bassin versant. -----	27
Figure 18. Influence de la lithologie sur la distribution des conductivités hydrauliques à l'échelle du bassin versant. -----	28
Figure 19. Comparaison des cartes NSE obtenues pour 3 cas types différents (a. Aber Plabennec : cas les plus perméables avec 2 espaces de paramètres optimaux bien développés et des NSE _{log} autour de 0.8; b. Mignonne : cas intermédiaire avec 2 espaces de paramètres optimaux développés et des NSE _{log} autour de 0.8; c. Arguenon : cas les moins perméables avec 2 espaces de paramètres optimaux peu développés et des NSE _{log} autour de 0.5). -----	29
Figure 20. Comparaison des cartes des aires moyennes saturées obtenues pour 3 cas types différents (a. Aber Plabennec : cas les plus perméables avec 2 espaces de paramètres optimaux bien développés et des NSE _{log} autour de 0.8; b. Mignonne : cas intermédiaire avec 2 espaces de paramètres optimaux développés	

et des NSE_{\log} autour de 0.8; c. Arguenon : cas les moins perméables avec 2 espaces de paramètres optimaux peu développés et des NSE_{\log} autour de 0.5). ----- 30

Figure 21. Comparaison des débits simulés (modèle hs1D) et des débits observés pour la station hydrologique de l'Aber Plabennec (en rouge : débits simulés; en bleu : débits observés). a) Espace de paramètre optimal 1; b) Espace de paramètre optimal 2. ----- 31

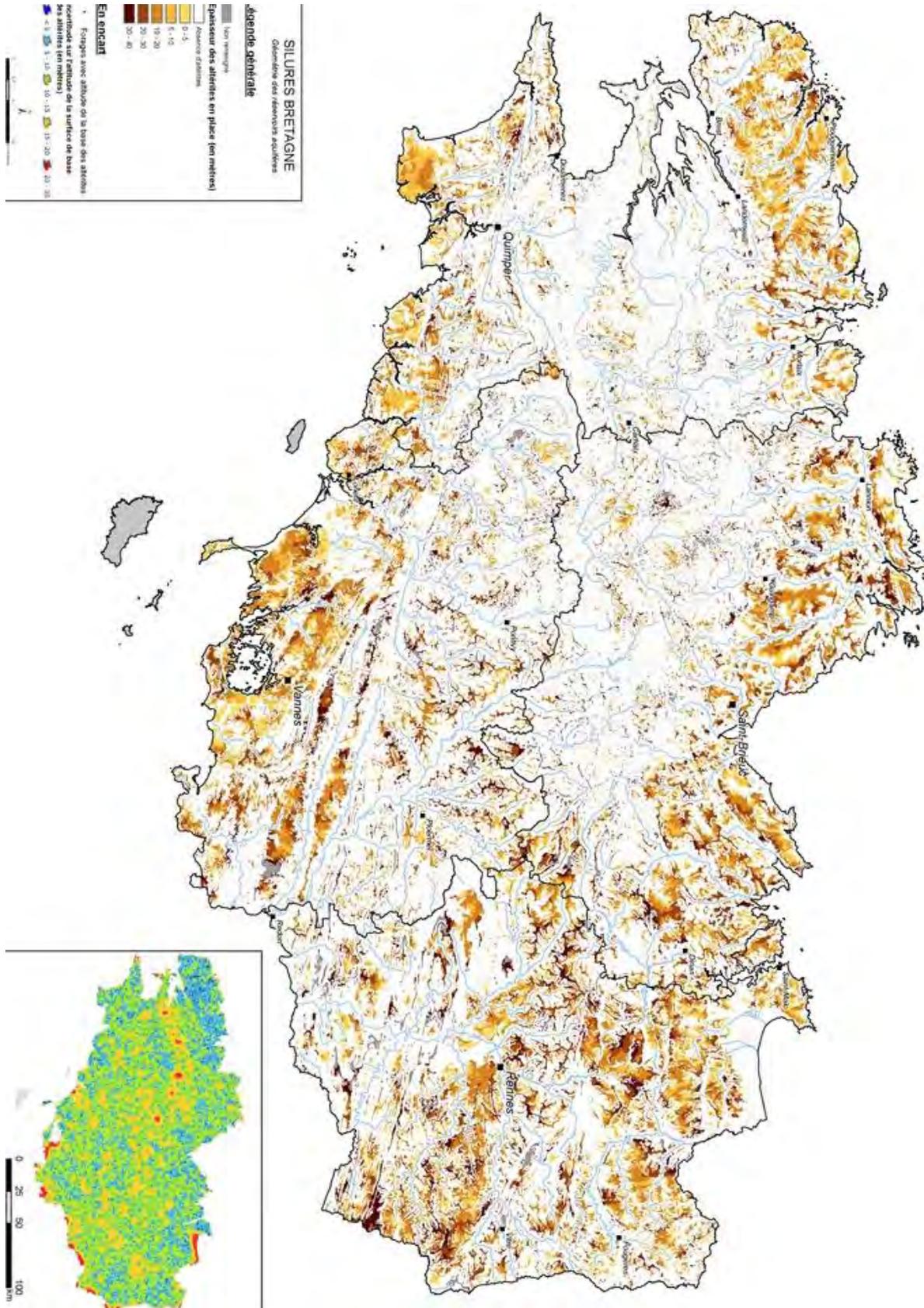
Figure 22. Comparaison des débits simulés (modèle hs1D) et des débits observés pour la station hydrologique de la Mignonne (en rouge : débits simulés; en bleu : débits observés). a) Espace de paramètre optimal 1; b) Espace de paramètre optimal 2. ----- 32

Figure 23. Comparaison des débits simulés (modèle hs1D) et des débits observés pour la station hydrologique de l'Arguenon (en rouge : débits simulés; en bleu : débits observés). a) Espace de paramètre optimal 1; b) Espace de paramètre optimal 2. ----- 33

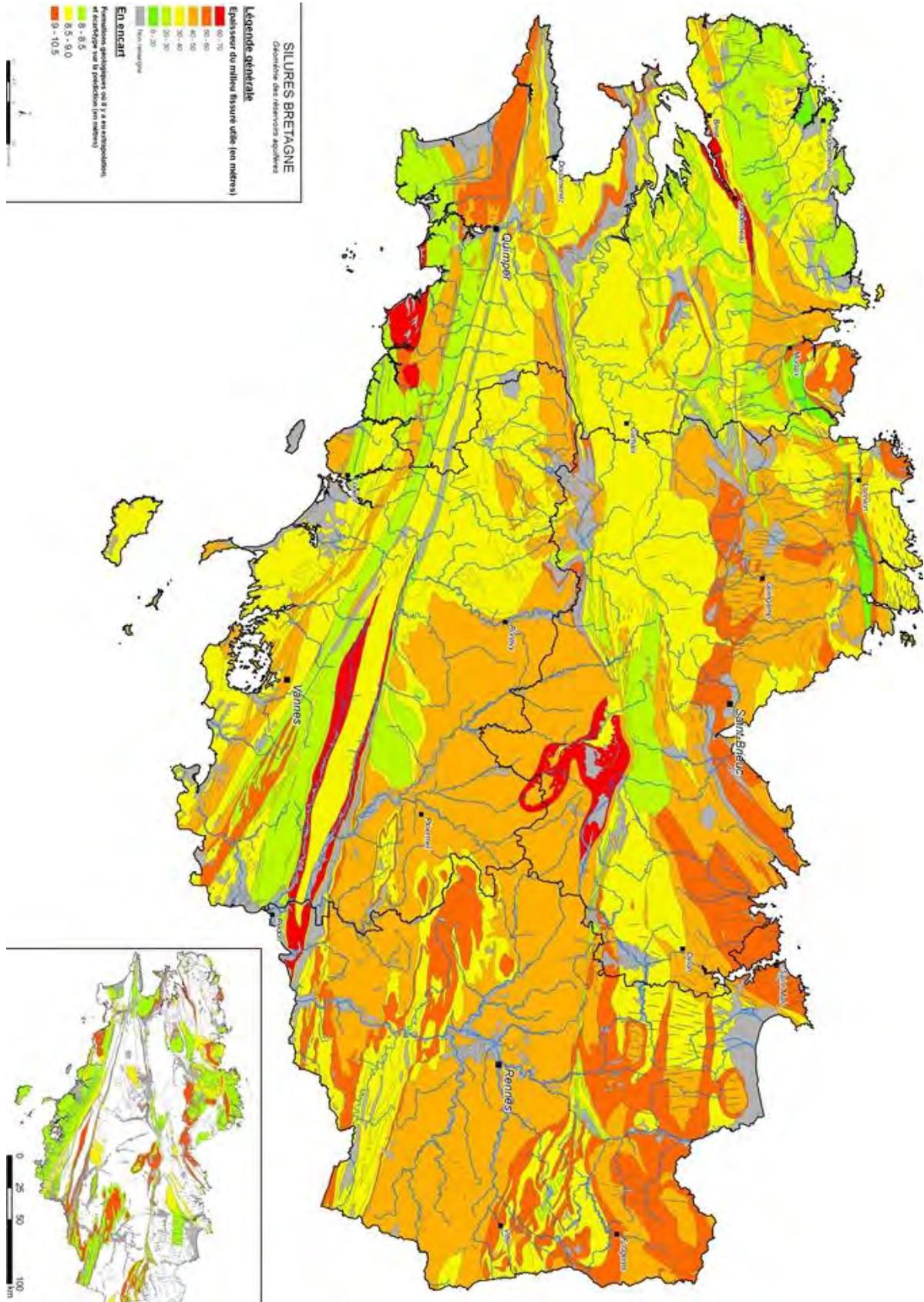
Liste des tableaux

Tableau 1. Gamme d'exploration des paramètres.....	21
Tableau 2. Description des variables utilisées pour l'ACP.....	24

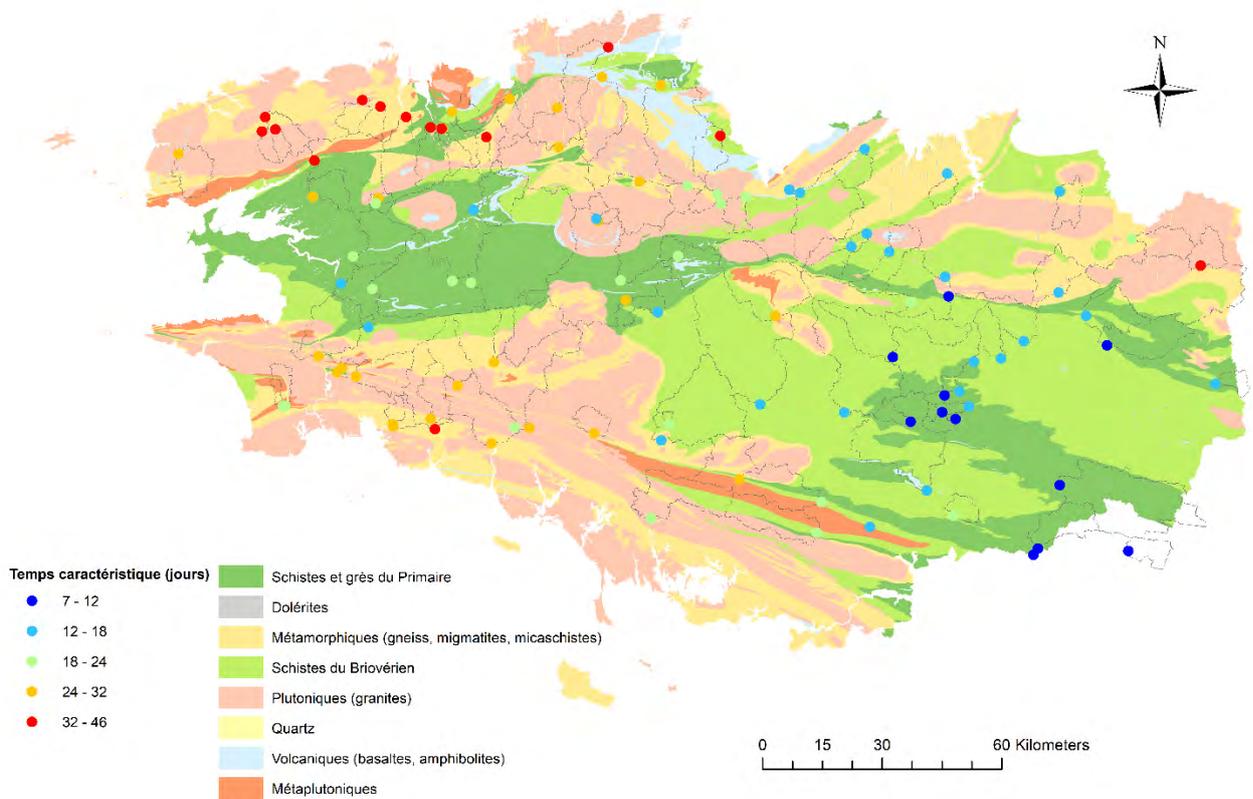
Annexe I. Carte de l'épaisseur des altérites (Mougin et al. 2008).



Annexe II. Carte de l'épaisseur du milieu fissuré (Mougin et al. 2008).



Annexe III. Cartographie régionale du temps caractéristique de récession estimé à l'échelle du bassin versant.



Annexe IV. Influence de la lithologie sur la distribution des temps caractéristiques de récession à l'échelle du bassin versant.

